



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Cálculo de uniones bridadas con junta de
estanquidad

Calculation of gasketed circular flange connections

Autor/es

Pablo Germán Arauzo

Director/es

Javier Amadeo Blasco Alberto

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2020-2021



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D^a. _____, en
aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de
septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el
Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,
Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
(Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser
citada debidamente.

Zaragoza,

Fdo:

Cálculo de uniones bridadas con juntas de estanquidad

Resumen

Las bridas son un elemento fundamental en las instalaciones de tuberías. Su función principal es unir mediante pernos dos elementos de la instalación como pueden ser tuberías, bombas, tanques, compresores, etc.

El presente trabajo es un estudio de la tasa de fugas en las bridas, ya que se tratan del componente más crítico en toda la instalación y, por tanto, el que más fugas presenta.

Para ello se ha realizado un programa informático en Python siguiendo la norma UNE-EN 1591-1:2013 acerca de las reglas de diseño de las uniones de bridas circulares con junta de estanquidad.

Primeramente, se ha diseñado dicho programa informático y, posteriormente, se han comparado los resultados obtenidos en Python con los obtenidos en el programa FLG de la empresa Red-Bag.

Abstract

Flanges are a fundamental element in pipe installations. Its main function is to bolt together two elements of the installation such as pipes, pumps, tanks, compressors, etc.

The present work is a study of the leakage rate in the flanges, since they are the most critical component in the entire installation and, therefore, the one with the most leaks.

To do this, a computer program has been made in Python following the UNE-EN 1591-1:2013 standard on the design rules for circular flange joints with sealing gaskets.

First of all, this computer program has been designed and, later, the results obtained in Python have been compared with those obtained in the FLG program of the Red-Bag company.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción general	1
1.2. Emisiones fugitivas	3
1.3. Motivación	5
1.4. Objetivos	6
2. DESCRIPCIÓN PROGRAMA INFORMÁTICO	7
2.1. Diagrama de bloques	8
2.2. Bloque 1	9
2.3. Bloque 2	12
2.4. Bloque 3	13
2.5. Bloque 4	14
2.6. Bloque 5	14
2.7. Bloque 6	15
2.8. Bloque 7	15
2.9. Bloque 8	16
2.10. Bloque 9	17
3. RESULTADOS FLG Y PYTHON	19
3.1. Relaciones de carga caso 1: Brida integral 1	19
3.2. Relaciones de carga caso 2: Brida integral 2	20
3.3. Relaciones de carga caso 3: Brida ciega	20
3.4. Relaciones de carga caso 4: Brida loca	21
3.5. Comparación FLG - Python	21
4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	23
4.1. Conclusiones	23
4.2. Trabajo futuro	24
5. BIBLIOGRAFIA	26

ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMA FLG	28
ANEXO B. PROGRAMA PYTHON	40
ANEXO C. RESULTADOS	64
ANEXO D. GLOSARIO	66

Índice de Imágenes

1. Imagen 1. Brida integral.	1
2. Imagen 2. Brida ciega.	1
3. Imagen 3. Brida loca.	2
4. Imagen 4. Junta de estanquidad.	2
5. Imagen 5. Perno.	2
6. Imagen 6. Tuerca.	3
7. Imagen 7. Arandela.	3
8. Imagen 8. Evolución anual emisiones fugitivas	4
9. Imagen 9. Emisiones fugitivas a través de cámara FLIR.	5
10. Imagen 10. Coeficientes de fricción.	10
11. Imagen 11. Medidas en la brida.	13
12. Imagen 12. Fuerzas sobre la brida.	16
13. Imagen 13. Rotación de una brida.	18
14. Imagen A.1. Ventana ' <i>Flange General</i> '.	27
15. Imagen A.2. Ventana ' <i>Select Flange</i> '.	28
16. Imagen A.3. Ventana ' <i>Flange Type Detail</i> '.	28
17. Imagen A.4. Ventana selección ' <i>Gasket</i> '.	29
18. Imagen A.5. Ventana ' <i>Select Gasket</i> '.	29
19. Imagen A.6. Ventana elección proveedor junta.	30
20. Imagen A.7. Ventana selección perno, tuerca y arandela.	31
21. Imagen A.8. Ventana ' <i>Select Bolt</i> '.	31
22. Imagen A.9. Ventana selección corona.	32
23. Imagen A.10. Ventana ' <i>Select Pipe</i> '.	32
24. Imagen A.11. Ventana ' <i>Assembly</i> ' dibujo completo.	33
25. Imagen A.12. Ventana casos de carga.	34
26. Imagen A.13. Ventana selección fuerzas y momentos exteriores.	35
27. Imagen A.14. Ventana propiedades componentes.	35
28. Imagen A.15. Ventana ' <i>Calculation</i> '.	36
29. Imagen A.16. ' <i>Summary Report</i> '.	36
30. Imagen A.17. ' <i>Detail Report</i> '.	37
31. Imagen A.18. ' <i>Last Iteration Validation</i> '.	38
32. Imagen C.1. Resultados FLG.	63
33. Imagen C.2. Resultados Python.	64

Índice de Tablas

1. Tabla 1. Entradas programa Python.	9
2. Tabla 2. Obtención de $Q_{\min.(L)}$ y $Q_{\text{smín}(L)}$	11
3. Tabla 3. Obtención de $Q_{\text{smáx}}$	11
4. Tabla 4. Obtención de P_{QR}	11
5. Tabla 5. Obtención de EG y eG.	12
6. Tabla 6. Relación de carga en FLG caso 1.	19
7. Tabla 7. Relación de carga en Python caso 1.	19
8. Tabla 8. Relación de carga en FLG caso 2.	20
9. Tabla 9. Relación de carga en Python caso 2.	20
10. Tabla 10. Relación de carga en FLG caso 3.	20
11. Tabla 11. Relación de carga en Python caso 3.	20
12. Tabla 12. Relación de carga en FLG caso 4.	21
13. Tabla 13. Relación de carga en Python caso 4.	21

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

Las **bridas** son parte imprescindible de cualquier sistema de tuberías. Su funcionamiento se basa en la unión de dos partes de una línea de tuberías, como pueden ser tubos, tanques, compresores, bombas u otros elementos, mediante una unión atornillada, lo cual permite poder desmontarla sin provocar destrucción.

Existen numerosos tipos de bridas dependiendo de la función que tenga que desempeñar, sin embargo, podemos agruparlas en tres grandes grupos:

- **Bridas integrales ('Integral Flange')**: la característica principal de esta brida es que la tubería se encuentra soldada al cuello de ella mediante soldadura a tope u otra forma de soldadura.

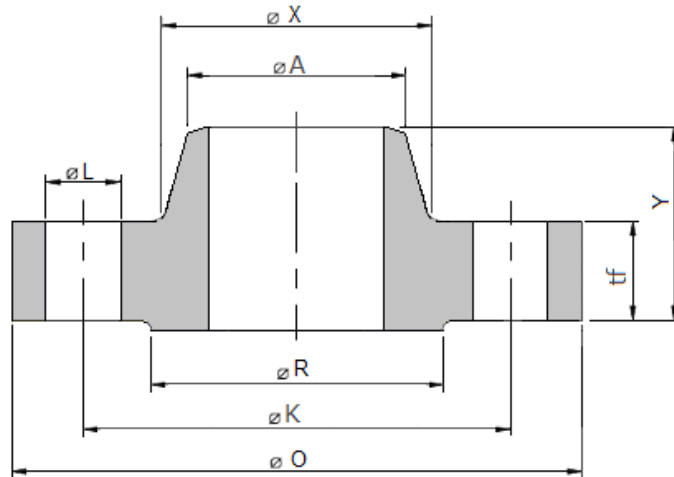


Imagen 1. Brida integral [9]

- **Bridas ciegas ('Blind Flange')**: estas destacan por tener una función diferente al resto, ya que en este caso su tarea no es unir dos partes, sino tapar uno de los extremos.

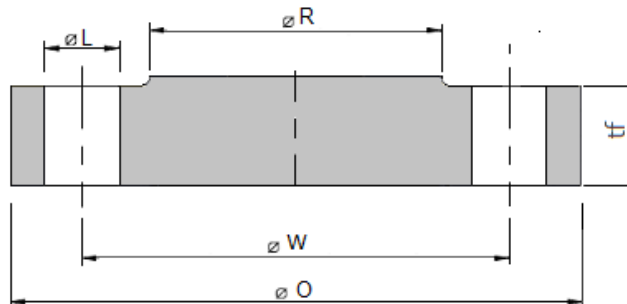


Imagen 2. Brida ciega [9]

- **Bridas locas ('Loose Flange')**: están formadas por dos partes: la brida de apoyo y el extremo del espárrago. El extremo se encuentra soldado a tope a

la tubería y la brida se desliza por el espárrago. Al no estar la brida unida a la tubería, esta puede girar y, por tanto, su alineación es más fácil que en otro tipo de bridas.

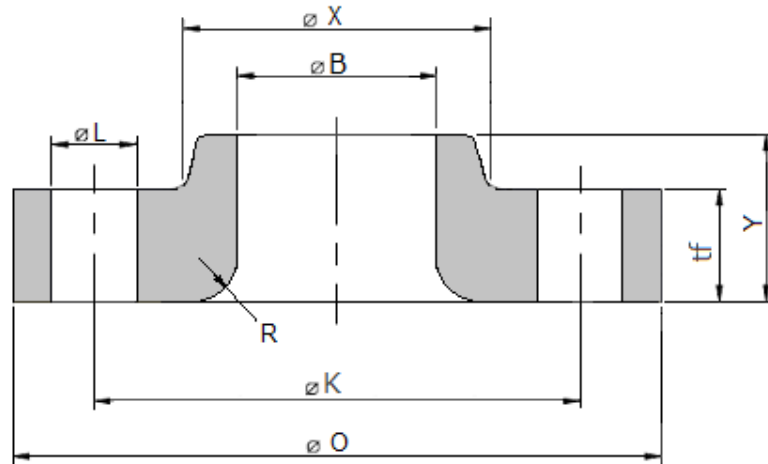


Imagen 3. Brida loca [9]

Todas estas bridas están compuestas por una serie de piezas imprescindibles para el funcionamiento de la brida; estos componentes son la **junta de estanquidad**, los **pernos**, las **tuercas** y las **arandelas**. La junta de estanquidad tiene la función de evitar la fuga del fluido transportado, esta se ubica entre las dos bridas y puede estar hecha de una gran variedad de materiales, diferenciando principalmente entre metálicos y no metálicos. En cuanto a los pernos, es uno de los elementos más importantes, son los encargados de mantener al conjunto unido debido a la elongación que sufren. Respecto a las tuercas, su empleo se entiende unido al de los pernos, ya que su función no es otra que unir la brida por el otro extremo del perno. Por último, las arandelas son un elemento que no es imprescindible, pero sí que es recomendable ya que ayuda a mejorar el contacto entre el perno y la tuerca con la brida, evitando también la entrada de suciedad dentro de la rosca del perno. En las imágenes siguientes vienen mostradas todas estas piezas.



Imagen 4. Junta de estanquidad



Imagen 5. Perno



Imagen 6. Tuerca



Imagen 7. Arandela

En lo que respecta al objetivo de las bridas, este es unir dos elementos del sistema de tuberías sin que se produzcan fugas en el sistema de tuberías, sin embargo, esto se antoja imposible, por lo tanto, a la hora de hacer el cálculo siempre hay que asumir una tasa de fugas predeterminada.

Alguno de los principales factores que influyen en la tasa de fugas son la presión del fluido transportado, la temperatura, la masa molar y la viscosidad del gas y las características de la junta de estanquidad. Además de todos estos factores, es lógico pensar que no se desea una interacción entre el fluido transportado y la junta y que, con el paso del tiempo, no se produzca ningún cambio en el material de esta, como podría ser endurecimiento, por ejemplo. Pese a saber que todos estos factores tienen una influencia directa sobre la tasa de fugas, la variedad de tipos de junta, los numerosos caminos de las fugas y la gran cantidad de parámetros que afectan a la tasa hacen que solo se puedan hacer suposiciones burdas acerca de estos factores de influencia. Por tanto, los ensayos experimentales son imprescindibles para conseguir la tasa de fugas deseada en las condiciones reales [1] [3].

1.2. Emisiones fugitivas

Las **fugas** son escapes que se producen por una falta de estanquidad en la unión bridada. Lo ideal es que estas pudiesen evitarse al completo, sin embargo, la realidad no es así y como la norma UNE-EN 1591-1:2013 [1] expone, esta se basa en el principio de que se ha de alcanzar una tasa de fugas seleccionada.

Estos escapes pueden ser producidos por múltiples razones diferentes y en muchas ocasiones, unas son provocadas por las otras. Además de los factores ya comentados en la introducción, como son la presión, temperatura, tipo de fluido transportado o características de la junta de estanquidad, hay una serie de otros factores que también tienen una influencia directa sobre las fugas.

El primero de ellos es el **factor humano**, este puede deberse a una mala formación de los operarios encargados del mantenimiento o apriete de las bridas. Otro factor influyente y, relacionado con el anterior, es debido a una **tensión irregular de los pernos**, esto se puede deber a un mal apriete de ellos generando que unos se encuentren muy tensionados y otros sin la tensión necesaria. Una **alineación**

incorrecta entre las dos bridas puede generar también un apriete irregular de los pernos o un inadecuado asentamiento de la junta de estanquidad provocando una zona de tensión irregular. Y el último factor a destacar, pero no menos importante, es que las **caras de contacto** entre las bridas se encuentren **sucias o con irregularidades** como pueden ser oxidación, arañazos o salpicaduras de soldadura. Estos son algunos de los factores más importantes que pueden generar fugas, pero eso no significa que sean los únicos.

Dentro de todas las fugas posibles, hay un tipo de ellas especialmente peligroso que son las llamadas **emisiones fugitivas**, estas se definen como un escape continuo por pérdida gradual de estanquidad de los equipos.

Este tipo de fugas, aparte de suponer una pérdida evidente de dinero para la empresa, conlleva muchos más problemas como pueden ser la contribución al cambio climático, la contaminación del aire y los problemas de salud de los empleados del lugar de trabajo. Se estima que alrededor del 5% de las emisiones globales de efecto invernadero son debidas a las emisiones fugitivas, pero es posible que sean incluso superiores. Aunque su propia naturaleza hace que sea difícil calcularlas, se puede hacer una estimación de ellas y ver su evolución con el paso de los años [4] [5] [12].

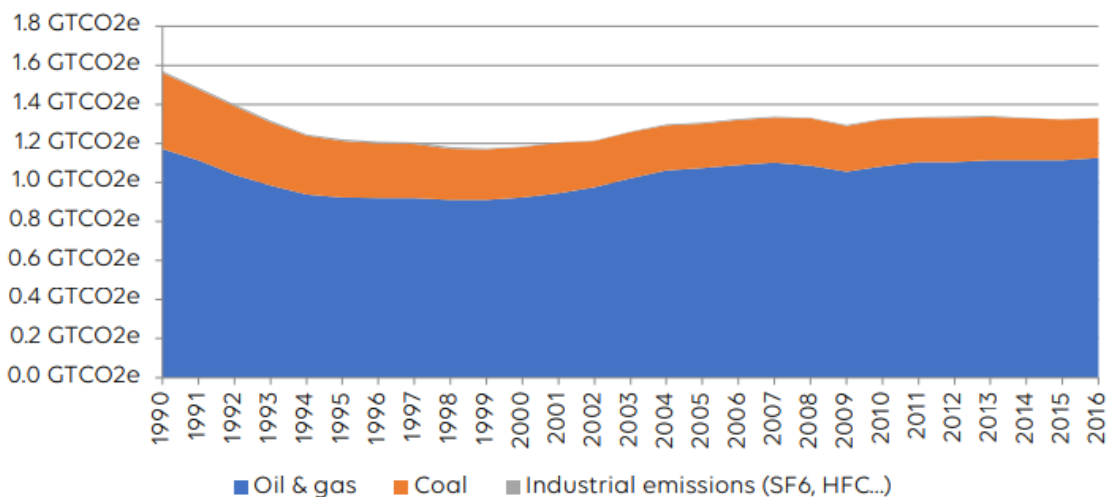


Imagen 8. Evolución anual emisiones fugitivas [12]

El principal problema es que las emisiones fugitivas no son perceptibles por ninguno de los sentidos, ni por la vista, ni olfato, ni por el oído, lo cual complica encarecidamente su detección, como se puede observar claramente en los siguientes videos [6] [7]. Su identificación solamente es posible mediante **analizadores de COV** (Compuestos Orgánicos Volátiles). Este tipo de compuesto, como por ejemplo el benceno, son muy dañinos para el ser humano ante una larga exposición y, a su vez, son muy comunes en las refinerías de petróleo o plantas químicas. Además de estos problemas, las emisiones de COV, aumentan significativamente el riesgo de explosión o incendio.

Aunque son muy difíciles de identificar, es posible determinar aquellas actividades que favorecen más la aparición de este tipo de fugas, estas son: la quema de gas, la cadena logística de hidrocarburos y la cadena de suministro del carbón.

En cuanto a la eliminación de este tipo de fugas, se antoja difícil. Todas las soluciones radican de una rápida detección. La detección de ellas debe realizarse regularmente utilizando dispositivos de detección de gas.

‘**Method 21**’ es un método que implica un detector de ionización de llama y se trata de una de las técnicas más empleadas para la detección de emisiones fugitivas, sin embargo, este método no está diseñado para usarse como indicador de la tasa de fugas.

Otro método de detección de fugas son las cámaras **FLIR** (*Forward Looking InfraRed*). Este tipo de cámaras permiten la detección rápida y precisa de distintos tipos de gases, como pueden ser el metano, el hexafluoruro de azufre, etc. También se trata de un método muy seguro, ya que se puede realizar a una distancia considerable y para zonas de difícil acceso.

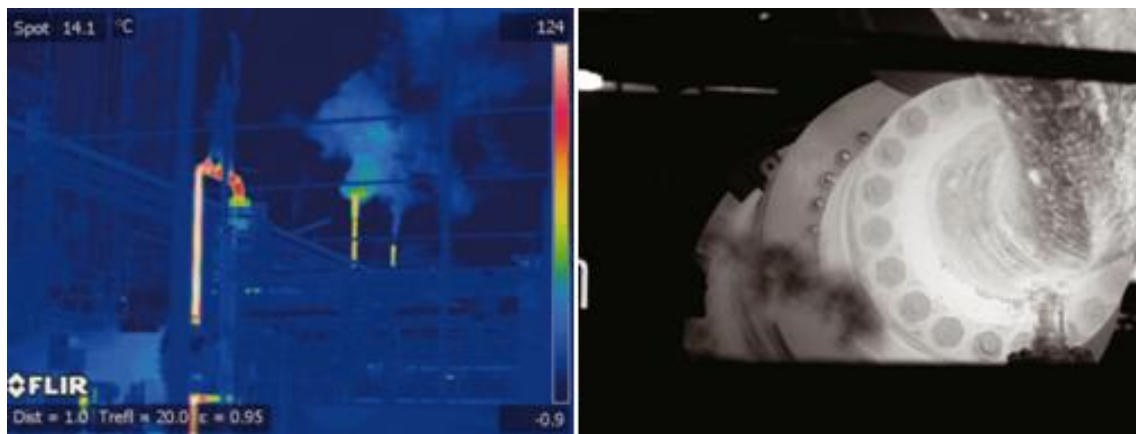


Imagen 9. Emisiones fugitivas a través de cámara FLIR

El último método de detección de fugas es el llamado **DIAL** (*‘differential absorption lidar’*) [2]. Es una técnica muy parecida al RADAR, se basa en la transmisión de luz a un objetivo para que interactúe con él, una parte sale reflejada, la cual el dispositivo recibe. La principal utilidad de este aparato es la detección de concentraciones de compuestos químicos tales como el ozono, vapor de agua, etc.

1.3. Motivación

Las bridas son unos elementos críticos en las instalaciones de tuberías ya que son los componentes más propensos a presentar fugas.

Cuando se selecciona una brida, el principal aspecto que se tiene en cuenta es su **resistencia mecánica**. Para conseguir esto se consultan unos diagramas presión-temperatura de la norma ANSI/ASME B16.5 [11] que permiten elegir la clase de brida a emplear (150, 300, 600, etc). También se debe seleccionar el **tipo de brida** adecuado para cada situación, por ejemplo *‘welding neck’* o *‘slip-on’*. Asimismo, el tipo de **junta de estanquidad** debe ser elegido teniendo en cuenta las condiciones del proceso como son la temperatura o la corrosión del fluido transportado por su interior.

Lo expuesto en el párrafo anterior es conocido por la mayoría de ingenieros de tuberías. Sin embargo, existen otros aspectos a revisar para garantizar el correcto funcionamiento de la brida:

- Es necesario calcular el par de apriete que se debe aplicar a los pernos para conseguir la tasa de fugas deseada.
- Hay que comprobar que la carga de las diferentes componentes tanto en el montaje como durante el funcionamiento para que se encuentre entre los valores máximo y mínimos.

Los cálculos anteriores se describen en la norma UNE-EN 1591-1:2013 [1]. Esta norma está compuesta por unas 150 fórmulas con más de 200 variables involucradas. Los cálculos de la norma son complejos y requieren algo de programación, como puede ser iteración, por lo que no es posible implementarlas en una hoja de cálculo.

La principal motivación de este TFG es crear una herramienta informática que permita realizar estos cálculos fácilmente de forma que se asegure la integridad mecánica y la estanquidad de la brida.

1.4. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo consiste en desarrollar un programa informático para comprobar si una brida concreta puede cumplir una determinada tasa de fugas según la Norma UNE-EN 1591-1:2013 [1].

Para poder llevar a cabo la realización del programa, se han fijado una serie de objetivos:

- Entender la Norma UNE-EN 1591-1 2013 [1].
- Conocimiento de los diferentes tipos de bridas y sus componentes.
- Comparar los resultados obtenidos en el programa informático desarrollado con los obtenidos en el programa FLG de la empresa Red-Bag [10].
- Análisis de las diferentes fuerzas y momentos actuantes sobre la brida y sus componentes.

Todos estos son los objetivos para conseguir el objetivo principal del trabajo, sin embargo, no han sido los únicos. También se ha fijado como objetivo la realización de un estudio de los problemas causados por la tasa de fugas, más concretamente los relacionados con las llamadas emisiones fugitivas, se han buscado sugerencias de mejora del programa FLG y, por último, se han buscado fallos en este mismo programa.

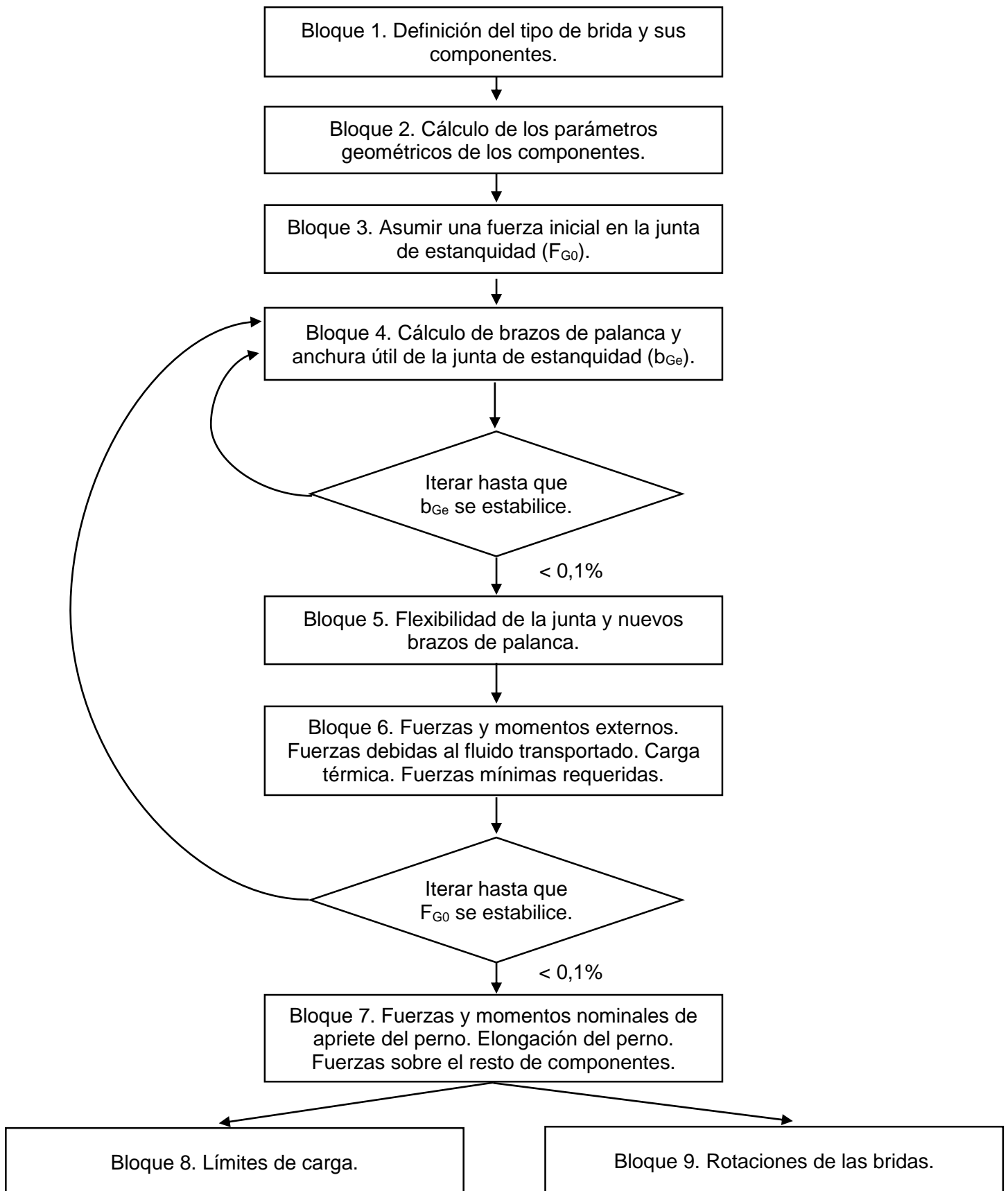
2. DESCRIPCIÓN PROGRAMA INFORMÁTICO

El programa en Python ha sido diseñado siguiendo minuciosamente la norma UNE-EN 1591-1:2013 [1] con el objetivo de replicar los cálculos obtenidos en el software FLG. Sin embargo, hay alguna pequeña modificación de las ecuaciones que la componen ya que los cálculos del programa FLG están realizados con una actualización de esta norma. Por esta misma razón, el código Python se encuentra actualizado en las fórmulas que así lo precisaban debido a esta nueva norma.

Para entender el programa, se ha realizado un diagrama de bloques para explicar la secuencia de cálculo y así poder desarrollar de forma más clara y concisa lo que se realiza en cada uno de estos bloques y las condiciones que ha de cumplir para poder continuar con el cálculo.

Al acabar el cálculo y, aunque ahí no aparece representada, una vez obtenidos los límites de carga el paso final para saber si la solución es la correcta o no es comprobar que todos estos son inferiores a uno, si así es, la solución es adecuada. Sin embargo, si estos límites de carga son superiores a la unidad, habría que descartar este tipo de brida ya que no se sería correcta y proponer un conjunto nuevo con otras dimensiones.

2.1. Diagrama de bloques



2.2. Bloque 1

Antes de empezar a realizar los cálculos, hay que **definir** cada uno de los **diferentes componentes**. Hay que concretar los tipos de brida de las dos bridas presentes, ya que como en los apartados siguientes se explicará, las formulas son diferentes. Además de esto, hay que definir el tipo de junta de estanquidad y si es o no metálica; si hay o no hay collarín y arandela; y por el último, el tipo de carcasa, campana y el método de apriete. Todas estas entradas y las posibilidades de selección de estas se muestran en la tabla siguiente:

Tipo de brida 1 y 2	Brida integral
	Brida ciega
	Brida loca
Collarín	True (si hay collarín)
	False (si no hay collarín)
Tipo sección de la junta de estanquidad	Junta plana
	Junta con superficie curva
	Junta octogonal
	Junta oval o circular
Material junta de estanquidad	Metálica
	No metálica
Tipo de apriete de los pernos	Manual
	Llave dinamométrica
Tipo de carcasa	Carcasa cónica
	Carcasa cilíndrica
	Carcasa esférica
Arandela	True (si hay arandela)
	False (si no hay arandela)
Tipo de campana	Brida acampanada cónica
	Brida no acampanada

Tabla 1. Entradas programa Python

Una vez definidas todas las componentes, el siguiente paso a realizar es la **introducción de las medidas** de ellos. Estas medidas son las referentes a todos los diámetros, espesores, coeficientes de fricción, ángulos de inclinación, etc. En relación a los coeficientes de fricción, estos son cruciales para asegurar la fijación de las diferentes piezas y evitar que estas deslicen unas sobre otras. Son tres los coeficientes de rozamiento principales. μ_G , es el coeficiente de fricción entre la junta de estanquidad y la cara de la brida; μ_N , coeficiente de fricción bajo la tuerca o la cabeza del perno; por último, μ_T , que es el coeficiente de fricción sobre la rosca. Los coeficientes μ_T y μ_N influyen y permiten calcular la fuerza que hacer el perno en el apriete. Por esta misma razón, la lubricación se antoja esencial. Si la lubricación es buena, estos coeficientes de fricción disminuyen y, por consiguiente, el momento de apriete del perno disminuye. Aun así, la determinación del valor de μ_T y μ_N no es fácil y siempre se utilizan valores aproximados. Para superficies lisas y lubricadas el valor se encuentra entre 0,10 y 0,15; para condiciones medias 'normales', entre 0,15 y 0,25; y para superficies rugosas y sin lubricar entre 0,20 y 0,35. Sin embargo, es el fabricante del lubricante el que va a proporcionar valor de coeficientes de fricción más exactos.

En la imagen siguiente aparecen señalados el lugar donde actúan dichos coeficientes sobre la brida.

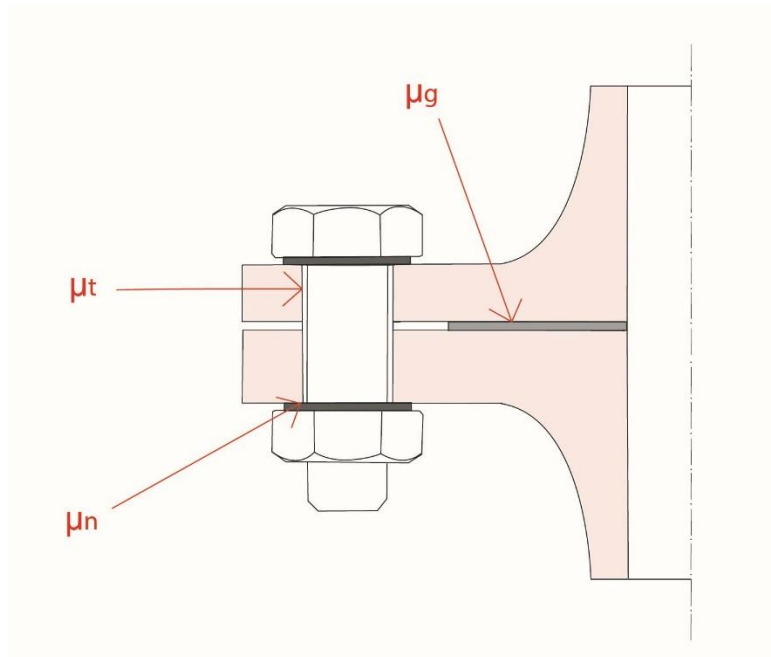


Imagen 10. Coeficientes de fricción

Además de las todas las dimensiones, hay que introducir también los **escenarios de carga**, vienen definidos por la letra I. Para ello es necesario saber los materiales de los que están fabricados cada una de las componentes ya que los datos a introducir son módulos de elasticidad, esfuerzos nominales o coeficientes de expansión térmica y, por tanto, son diferentes para cada material. El último paso para definir los diferentes escenarios de carga, que en su mayoría de las veces son cuatro, es determinar las temperaturas de cada uno de los componentes. Los escenarios de carga siempre se definen de la misma manera:

- **Escenario 0 (I=0):** hace referencia a la condición de montaje. En este escenario la presión es siempre cero, ya que no circula ningún fluido por el interior de la brida. Además, la temperatura en todas las componentes es la temperatura ambiente, 20°C.
- **Escenario 1 (I=1):** este se refiere a la condición de test. En este escenario la presión ya es superior a cero, esto se debe a que en este caso sí que circula fluido por el interior de esta y, respecto a la temperatura, es igual que para el escenario 0, de 20°C.
- **Escenarios 2, 3... (I=2, 3...):** estos casos se refieren ya a las condiciones de funcionamiento. En estos circula un fluido por el interior de la brida, en cada uno a una presión diferente y en estos casos la temperatura no tiene porqué ser la temperatura ambiente.

Respecto a la **tasa de fugas**, en el programa FLG se introduce directamente, sin embargo, en Python no es así. Esto se debe a que la tasa de fugas no se encuentra directamente en ninguna ecuación, sino que hay una serie de valores que dependen de ella. Estos valores son $Q_{\text{mín.}(L)}$, $Q_{\text{smín}(L)}$ y $Q_{\text{smáx.}}$. Estos tres valores vienen determinados

por la norma UNE-EN 13555:2014 y para obtenerlos se utilizan las hojas de datos de junta de estanquidad [8]. De ellas se extraen estos valores que posteriormente van a ser necesarios para el cálculo.

En la siguiente imagen aparece mostrada la tabla en la cual, dependiendo del valor deseado de la tasa de fugas, se obtiene $Q_{\min(L)}$ y $Q_{\min(L)}$, aunque para este segundo valor es necesario también el de Q_A . Este valor es la presión en la superficie de la junta de estanquidad en el montaje antes de la descarga y se calcula como la división de la fuerza inicial sobre la junta de estanquidad entre el área útil de esta.

Minimum stress to seal $Q_{\min(L)}$ (at assembly), $Q_{\min(L)}$ (after off-loading) for $p = 40$ bar										
L [mg/(s*m)]	$Q_{\min(L)}$ [MPa]	$Q_{\min(L)}$ [MPa]								
		$Q_A = 5$ MPa	$Q_A = 10$ MPa	$Q_A = 15$ MPa	$Q_A = 20$ MPa	$Q_A = 25$ MPa	$Q_A = 30$ MPa			
10^0	3	3	3	3	3	3	3			
10^{-1}	3	3	3	3	3	3	3			
10^{-2}	3	3	3	3	3	3	3			
10^{-3}	3	3	3	3	3	3	3			
10^{-4}	3	3	3	3	3	3	3			
10^{-5}	5		6	5	5	4	3			
10^{-6}										
10^{-7}										
10^{-8}										

Tabla 2. Obtención de $Q_{\min(L)}$ y $Q_{\min(L)}$ [8]

Maximal applicable gasket stress Q_{\max}				
Q_{\max} [MPa] ambient temperature	Q_{\max} [MPa] – temperature 1 [50 °C]	Q_{\max} [MPa] – temperature 2 [100 °C]		
15	15	15		

Tabla 3. Obtención de Q_{\max} [8]

El primero de ellos, $Q_{\min(L)}$, hace referencia al nivel mínimo de presión en la superficie de la junta de estanquidad para esa tasa de fugas L en la condición de montaje. El segundo, $Q_{\min(L)}$, es lo mismo que el primero de estos valores con la única diferencia que este es para el resto de condiciones de montaje. Y ya, por último, Q_{\max} , que es la presión máxima en la superficie de la junta de estanquidad que se puede aplicar de forma segura sobre esta a la temperatura de funcionamiento.

Además de estos tres valores obtenidos en las tablas anteriores, de estas hojas se han de extraer algún dato más como es el caso de P_{QR} , E_G y $e_G(Q_{G0})$.

Relaxation ratio P_{QR} for stiffness $C = 500$ kN/mm										
Gasket stress	ambient temperature		temperature 1 [50 °C]		temperature 2 [75 °C]					
	P_{QR}	Δe_{Gc} [mm]	P_{QR}	Δe_{Gc} [mm]	P_{QR}	Δe_{Gc} [mm]	P_{QR}	Δe_{Gc} [mm]	P_{QR}	Δe_{Gc} [mm]
Stress level 1 [3,5 MPa]	0.91	0.003	0.85	0.004	0.87	0.004				
Stress level 2 [6,5 MPa]	0.86	0.008	0.77	0.013	0.72	0.015				
Stress level 3 [10 MPa]	0.83	0.015	0.75	0.021	0.63	0.031				

Tabla 4. Obtención de P_{QR} [8]

Sekant unloading modulus of the gasket E_G [MPa] and gasket thickness e_G [mm]										
Gasket stress [MPa]	ambient temperature		temperature 1 [50 °C]		temperature 2 [75 °C]					
	E_G [MPa]	e_G [mm]	E_G [MPa]	e_G [mm]	E_G [MPa]	e_G [mm]	E_G [MPa]	e_G [mm]	E_G [MPa]	e_G [mm]
0		3.997		4.009		3.943				
1		3.738		3.813		3.755				
2	29	3.371	28	3.419	33	3.412				
4	39	3.143	38	3.201	50	3.180				
5	51	2.974	49	3.020	72	2.984				
7	79	2.835	86	2.849	102	2.815				
9	116	2.717	116	2.703	129	2.670				
10	157	2.612	150	2.580	155	2.547				
13	228	2.453	214	2.406	221	2.342				
17	311	2.334	306	2.271	315	2.172				
20	413	2.249	414	2.156						
26	656	2.133	668	1.976						
33	902	2.041	875	1.836						
39	1173	1.959								

Tabla 5. Obtención de E_G y e_G [8]

En estas dos últimas tablas es necesario saber el valor de la tensión sobre la junta de estanquidad (*'gasket stress'*), este valor viene definido como Q_G en el programa de Python y se calcula como la relación entre la fuerza soportada por la junta de estanquidad entre su área útil.

2.3. Bloque 2

El segundo bloque trata del **cálculo de los parámetros de cálculo** de las diferentes componentes. En este apartado vienen definidas todas las fórmulas geométricas relativas al cálculo de áreas, diámetros o espesores medios, módulos de flexibilidad, etc.

En la imagen siguiente aparecen mostradas las medidas correspondientes a un conjunto ejemplo de bridas. En ella aparecen mostradas tanto las medidas introducidas al principio como las calculadas posteriormente y, entre otras cosas, se pueden observar diferentes diámetros y espesores.

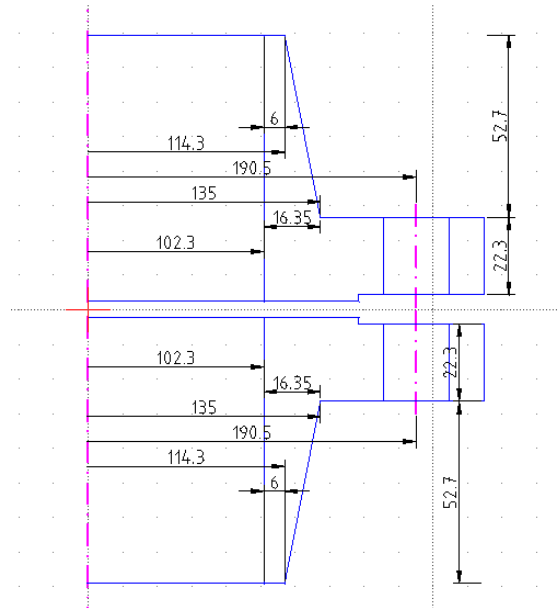


Imagen 11. Medidas en la brida

Es necesario realizar el cálculo de todos estos parámetros ya que las medidas introducidas en el bloque 1 son las medidas reales y, a pesar de esto, estas no son las que se utilizan en los cálculos posteriores.

2.4. Bloque 3

Antes de realizar el cálculo del resto de valores, es necesario **asumir una fuerza inicial sobre la junta de estanquidad, F_{G0}** . Para ello, hay dos ecuaciones diferentes las cuales dependen de si se ha introducido o no una fuerza específica de apriete sobre los pernos.

$$F_{G0} = F_{B0, SPECIFIED} * (1 - \varepsilon_-) - F_{R0}$$

$$F_{G0} \leq A_B * \frac{f_{B0}}{3} - F_{R0}$$

El cálculo de esta variable es iterativo, es decir, se ha de conseguir la precisión deseada. Un 5% sería una precisión adecuada, sin embargo, se recomienda una **precisión inferior al 0,1%**, que es la que se ha adoptado. Por esta razón, se ha de fijar un valor inicial para ella para poder empezar el cálculo iterativo y, dependiendo de los datos de entrada, la fórmula va a ser diferente para así tener una primera aproximación más exacta de F_{G0} .

En cuanto al resto de valores que intervienen en las formulas, todas son introducidas o calculadas anteriormente, excepto F_{R0} , la cual hace referencia a la fuerza resultante de cargas exteriores y que, para esta primera aproximación, se ha supuesto cero en todos los casos realizados, esto significa que se ha supuesto que no actúan fuerzas exteriores sobre la brida. Sin embargo, como se trata de un caso iterativo, si esta suposición es incorrecta no supone ningún problema ya que posteriormente se recalcula F_{R0} .

Los bloques siguientes hasta el bloque 6 van a ir introducidos dentro de este, pese a esto, es recomendable separarlos en bloques distintos. La razón de esto es que en los bloques posteriores se calculan variables independientes al valor de la fuerza sobre la junta de estanquidad.

2.5. Bloque 4

Los cálculos realizados en este apartado son los relativos a los **brazos de palanca**, aunque no a la totalidad de los necesarios, y a la **anchura útil de la junta de estanquidad**, b_{Ge} .

Respecto a los brazos de palanca, estos se definen como la distancia perpendicular desde el eje de rotación al punto o la línea donde actúa la fuerza y, en este apartado, solo se calcula el relativo a la junta de estanquidad. Esto se debe a que es dependiente el valor de la anchura útil de la junta de estanquidad.

Este valor también se calcula mediante un proceso iterativo, al igual que la fuerza sobre la junta. La razón es que la anchura útil no es siempre la anchura total de la junta de estanquidad, sino que va a depender de una serie de factores, entre ellos del tipo de junta.

Al igual que con la fuerza, una precisión del 5% sería necesaria, sin embargo, es recomendable una **precisión inferior al 0,1%**. Por esta misma razón este bloque está separado del resto, pese a realizarse dentro del proceso iterativo de cálculo de la fuerza inicial sobre la junta de estanquidad.

2.6. Bloque 5

Como se ha comentado en el bloque 4, hay una serie de **brazos de palanca** y correcciones de estos que todavía faltan por calcular y que para calcularlos es necesaria la anchura útil de la junta de estanquidad.

Además de todos estos brazos de palanca, que posteriormente serán utilizados en los cálculos de los límites de carga, se calcula en este bloque la **flexibilidad de la junta de estanquidad**, X_G .

En la ecuación para el cálculo de la flexibilidad en la junta, aparece el término $e_G(Q_{G0})$ comentado anteriormente. Este término hace referencia al espesor inicial de la junta de estanquidad comprimida bajo la presión de contacto, Q_{G0} , y se calcula a partir de la curva de compresión de la junta de estanquidad calculada en la Norma EN 13555 o mediante la tabla 5.

2.7. Bloque 6

La última parte dentro del bucle de cálculo de F_{G0} es la correspondiente a este bloque, en el cual se llevan a cabo una serie de **cálculos de diferentes fuerzas**.

La primera de todas ellas es la debida a la **fuerza ejercida por el fluido** que se transporta por el interior de la brida. En la condición de montaje, escenario 0, esta fuerza va a ser siempre cero. Esto se debe a que cuando se monta la brida no se transporta ningún fluido, por lo que, lógicamente, la presión ejercida va a ser cero. Sin embargo, para el resto de condiciones no va a ser así. Si la presión es interior del fluido, $P_1 > 0$, la fuerza ejercida por este será positiva; en cambio, si la presión es exterior, $P_1 < 0$, esta fuerza será negativa.

El segundo grupo de fuerzas a calcular van a ser todas las **fuerzas y momentos externos**. Primeramente, hay que introducir las fuerzas exteriores actuantes sobre la brida, siempre y cuando las haya, y, posteriormente, se calculan las fuerzas resultantes de estas. En este apartado se calcula la fuerza resultante de las cargas exteriores, F_R , anteriormente comentada y utilizada para calcular F_{G0} .

La siguiente fuerza a obtener son las ocasionadas por los cambios de temperatura en las condiciones posteriores a la de montaje, también llamadas **cargas térmicas**. Estas fuerzas son ocasionadas debido a la diferencia de expansión del perno con respecto a la suma de las dos bridas, las dos arandelas y la junta de estanquidad. Esta fuerza va a depender directamente de los tipos de material empleados para la fabricación de cada componente debido a que cada uno va a tener un comportamiento diferente antes las variaciones de temperatura.

El último conjunto de fuerzas a calcular son las **fuerzas mínimas necesarias sobre la junta de estanquidad**. Estas fuerzas son muy importantes dado que tienen la función de asegurar la estanquidad, evitar la pérdida de contacto entre los pernos y las tuercas y, por último, contrarrestar un posible deslizamiento de la brida sobre la junta de estanquidad. En este caso hay que hacer una distinción entre la condición de montaje y el resto de condiciones a la hora de calcular la fuerza mínima.

2.8. Bloque 7

Una vez se obtiene la fuerza inicial sobre la junta de estanquidad correcta, el siguiente paso es obtener las **fuerzas y momentos del resto de las componentes** y, por otro lado, la **elongación de los pernos**.

Para calcular las **fuerzas y momentos nominales sobre los pernos**, primeramente, es necesario saber la forma de apriete de estos. El apriete de los pernos puede realizarse de manera manual, mediante llave dinamométrica o mediante tensor hidráulico. Este cálculo no puede realizarse antes debido a que es necesario saber el valor de la fuerza inicial requerida sobre los pernos, la cual se calcula como la suma de

la fuerza inicial sobre la junta de estanquidad y las fuerzas exteriores adicionales en la condición de montaje.

Finalmente, se calculan las **fuerzas sobre la junta de estanquidad y sobre los pernos** en las condiciones de funcionamiento. La fuerza sobre los pernos, que es la suma de la fuerza en todos los pernos, se obtiene como la suma de las fuerzas sobre la junta de estanquidad, la fuerza axial resultante de la presión del fluido y la fuerza resultante de cargas exteriores adicionales. En la imagen siguiente se muestra gráficamente la explicación de dicha fórmula.

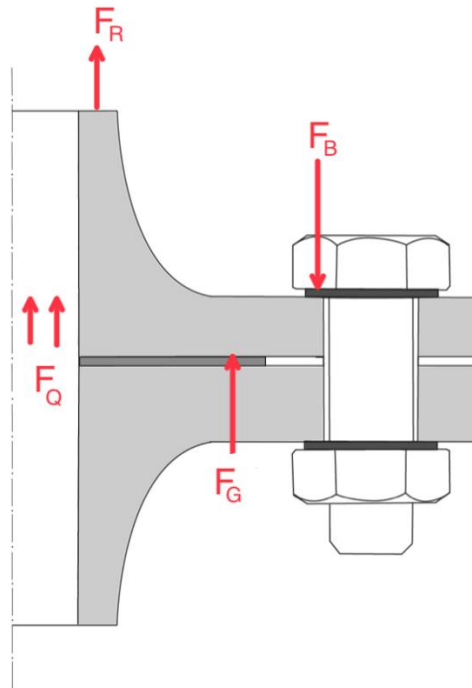


Imagen 12. Fuerzas sobre la brida

En cuanto a la **elongación de los pernos**, esta es la causante de la fuerza de apriete de los pernos. Estos están diseñados para sufrir una pequeña elongación y, debido a la elasticidad del material del cual están fabricados, hace que el perno intente volver a su posición inicial. Esta tensión, sumado a los coeficientes de fricción, genera la sujeción de los componentes de la brida.

2.9. Bloque 8

Los cálculos en este bloque son los que van a determinar si la tasa de fugas elegida se puede conseguir con la brida seleccionada o no, lo cual lo van a determinar los **límites de carga**. Si los límites de carga son **inferiores a la unidad**, el cálculo va a ser correcto, sin embargo, si estos son superiores a uno, lo que quiere decir que están por encima del 100%, significa que este componente va a estar sometido a más fuerza de la que puede soportar y acabará rompiendo. En definitiva, si los límites de carga son superiores a la unidad se debe repetir el cálculo con unas medidas diferentes debido a que la brida ensayada no sería la adecuada o elegir una tasa de fugas menos restrictiva y volver a realizar todo el cálculo.

Los límites de carga son calculados en las dos bridas, en la junta de estanquidad, en los pernos y, en el caso de que se trate de una brida loca, también en el '*loose ring*'.

Respecto a los pernos, esta relación de carga depende de la fuerza ejercida sobre ellos, su área y su esfuerzo nominal; esto se traduce en que el límite de carga es la relación entre la tensión a la que están sometidos los pernos con la tensión que son capaces de soportar. Esto es para las condiciones de funcionamiento, sin embargo, en la condición de montaje influye también la relación entre el momento de torsión aplicado a los pernos como resultado del par de apriete de estos respecto al momento de inercia de los pernos.

Para la junta de estanquidad el cálculo es parecido al de los pernos. La diferencia radica en que en este caso no influye el esfuerzo nominal de la junta, sino la presión máxima en la superficie de la junta que se puede imponer de forma segura sobre ella a la temperatura de funcionamiento sin que se produzcan daños.

En cuanto a las bridas, los cálculos de los límites de carga para ellas dependen del tipo de brida que sean, aunque pese a ser algo diferentes, todos se basan en una relación de momentos. Esta relación se calcula como las fuerzas actuantes sobre la brida en cuestión por sus respectivos brazos de palanca, lo que da lugar a los momentos actuantes sobre ella, entre la propia resistencia de la brida.

2.10. Bloque 9

En último lugar se calculan las **rotaciones de las bridas**, la cuales están calculadas en grados. Al igual que con las fugas, es imposible evitarlas al completo.

Estas rotaciones son debidas a los momentos que actúan sobre la brida y que provocan una relajación en los tornillos y, por tanto, la variación de la zona de contacto, afectando al sellado de esta. Por esta misma razón, la rotación de la brida es una reacción a evitar en la medida posible y también, al no poder evitarse al completo, es una de las razones por la cual la tasa de fugas es imposible que sea cero.

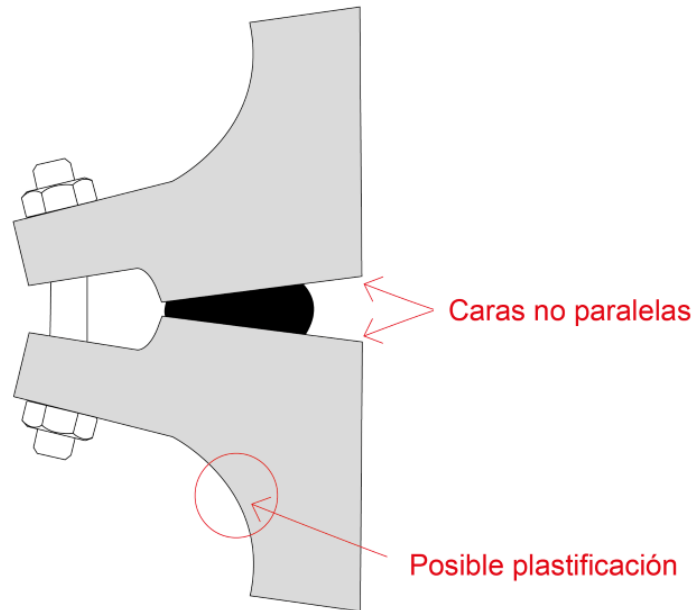


Imagen 13. Rotación de una brida

Como se observa en la imagen, en algunas bridas es posible que se produzcan algunas pequeñas **deformaciones plásticas**, tanto en la condición de montaje como en las condiciones posteriores.

Debido a esto, las rotaciones solo es posible evaluarlas en sus límites superior e inferior, asumiendo valores mínimos y máximos en la carga inicial de los pernos y, además de esto, solo es posible calcular la parte elástica de las rotaciones.

3. RESULTADOS FLG Y PYTHON

A continuación, se muestran los **resultados** obtenidos para los diferentes casos de estudio, tanto en FLG como en Python, tomando como referencia los obtenidos en FLG. Únicamente van a mostrarse los **valores obtenidos para las relaciones de carga** de los componentes, ya que se trata del más importante en el que hay que fijarse. Los límites de carga hacen referencia a la tensión que está sufriendo el componente en relación a la tensión que puede soportar cada uno de los ellos. Estos se muestran en porcentaje, es decir, si el resultado es 0,422781 quiere decir que se está utilizando el 42,2781% de la tensión permitida en ese componente. Por tanto, siempre **han de ser inferiores a la unidad** y, debido a esto, cuanto más altos sean, más cerca van a estar del máximo a soportar y, por tanto, más peligroso.

3.1. Relaciones de carga caso 1: Brida integral 1

FLG		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,422781	0,259417	0,507215	0,51671
Gasket load ratio	ϕ_G	0,176949	0,1	0,112692	0,121354
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,159474	0,142138	0,220202	0,232669
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,159474	0,142138	0,220202	0,232669
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-

Tabla 6. Relación de carga en FLG caso 1

Python		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,42277971	0,25941630	0,50604893	0,51440627
Gasket load ratio	ϕ_G	0,17694925	0,09999999	0,11238659	0,12074915
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,15947445	0,14145311	0,21862162	0,23081394
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,15947445	0,14145311	0,21862162	0,23081394
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-

Tabla 7. Relación de carga en Python caso 1

3.2. Relaciones de carga caso 2: Brida integral 2

FLG		I = 0	I = 1	I = 2
Bolt load ratio	ϕ_B	0,95587607	0,68926632	0,58575487
Gasket load ratio	ϕ_G	0,27009102	0,15357291	0,046495627
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,61804523	0,62731163	0,5759494
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,32350996	0,26522324	0,23402698
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-

Tabla 8. Relación de carga en FLG caso 2

Python		I = 0	I = 1	I = 2
Bolt load ratio	ϕ_B	0,95587553	0,68934230	0,58407017
Gasket load ratio	ϕ_G	0,27009102	0,15360827	0,04620592
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,60705340	0,71955312	0,70857088
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,34096862	0,42808621	0,46941783
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-

Tabla 9. Relación de carga en Python caso 2

3.3. Relaciones de carga caso 3: Brida ciega

FLG		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,664576	0,404865	0,797559	0,791689
Gasket load ratio	ϕ_G	0,330504	0,22	0,236831	0,241103
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,341213	0,284043	0,456549	0,479613
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,337068	0,312682	0,485984	0,498612
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-

Tabla 10. Relación de carga en FLG caso 3

Python		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,66967069	0,40486510	0,78181992	0,76273412
Gasket load ratio	ϕ_G	0,33303797	0,21999999	0,23175167	0,23175933
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,33834592	0,27819166	0,44003635	0,45334010
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,33965207	0,31268224	0,47760468	0,48206174
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	-	-	-	-

Tabla 11. Relación de carga en Python caso 3

3.4. Relaciones de carga caso 4: Brida loca

FLG		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,489871	0,313281	0,665985	0,726559
Gasket load ratio	ϕ_G	0,162414	0,1	0,122727	0,141927
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,129826	0,166426	0,259356	0,273411
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,129826	0,166426	0,259356	0,273411
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	0,245556	0,195636	0,350457	0,410445
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	0,245556	0,195636	0,350457	0,410445

Tabla 12. Relación de carga en FLG caso 4

Python		I = 0	I = 1	I = 2	I = 3
Bolt load ratio	ϕ_B	0,48987095	0,31328136	0,66508920	0,72483852
Gasket load ratio	ϕ_G	0,16241378	0,1	0,12253470	0,14155656
Flange 1 load ratio	ϕ_F	0,12982614	0,16373519	0,25434310	0,26914950
Flange 2 load ratio	ϕ_F	0,12982614	0,16373519	0,25434310	0,26914950
Loose ring 1 load ratio	ϕ_L	0,24555655	0,19563649	0,34998619	0,40947390
Loose ring 2 load ratio	ϕ_L	0,24555655	0,19563649	0,34998619	0,40947390

Tabla 13. Relación de carga en Python caso 4

3.5. Comparación FLG - Python

Respecto a las tablas anteriores, se puede observar que los valores obtenidos en Python son idénticos a los obtenidos en FLG exceptuando los límites de carga de las bridas integrales del caso 2 y, por esta razón, se encuentran marcados en color rojo. La razón de esta diferencia se debe a que los cálculos de FLG de este son anteriores a la actualización anteriormente comentada y a un fallo en el programa que posteriormente se explica en detalle, por lo tanto, los resultados correctos son los obtenidos en programa de Python.

Antes de comentar las conclusiones finales, es necesario explicar alguna de las diferencias más importantes entre los diferentes casos de estudio.

La primera de ellas es entre la brida integral 1 y la brida integral 2. Aparte de las propias diferencias entre los materiales, dimensiones, etc., las principales y más importantes son que en el caso 1 los pernos contienen arandelas, a diferencia del caso 2. Por otro lado, en este segundo caso se encuentra una fuerza específica de apriete de los pernos. Esto influye en diferentes cálculos, pero el más importante de ellos es en la inicialización de la fuerza en la junta de estanquidad en la condición de montaje.

Respecto al caso 3, es importante hacer una aclaración. A pesar de ser el caso que hace referencia a una brida ciega, realmente solo es así para la brida 2 dentro de este caso, ya que, todos los conjuntos de bridas están realmente formados por dos. La brida 1 de este conjunto se trata de una brida integral y, más concretamente, de una '*Welding Neck*'. Esto ocurre en todos los demás casos, la diferencia del resto sobre este es que en los otros la primera brida es idéntica a la segunda y por esa razón los resultados entre ellas son los mismos.

Por último, en el caso 4, podemos observar como es el único en el que los valores del límite de carga para el '*Loose ring*' son diferentes de cero. Esto se debe a que es el único caso en el que este elemento se encuentra presente y de ahí que tomen valores.

4. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

4.1. Conclusiones

Tras realizar los diferentes casos de estudio en Python, cabe destacar que se han conseguido obtener **resultados similares**, con una pequeña diferencia en el caso 2, el cual se trata de dos bridas integrales.

Este proceso se ha hecho comparando valor a valor los resultados obtenidos en Python con los resultados de FLG con la salida '*Last Iteration Validation*', la cual se encuentra explicada en el Anexo A. Aunque solo aparezcan aquí mostrados los resultados relativos a los límites de carga, se han comparado el resto de valores de salida y en todos ellos se han obtenido resultados similares y/o iguales a los de referencia.

Mediante este proceso se ha comprobado todas y cada una de las formulas llegando a alguna diferencia entre ellas. La mayoría de estas diferencias eran debidas a una actualización de la norma ya que como se comentó en el apartado 2, la norma ha sufrido una actualización y el software de FLG está realizado con esta nueva. Sin embargo, una formula presentaba una **errata**, la del cálculo de c_s , factor de corrección empleado en el cálculo de la relación de carga del anillo de la brida, ψ . Esta variable posteriormente es utilizada en el cálculo de la resistencia que ejerce la brida, también llamado momento sobre la brida, la cual es utilizada para calcular el límite de carga de la brida. Todos estos cálculos se encuentran realizados en el bloque número 8, en el cual se desarrollan los cálculos de los diferentes límites de carga. Respecto al error producido, este estaba entorno al 5%.

Esta errata se debía a que el término $\pi/4$ se encontraba multiplicando al resto de la ecuación y no únicamente a la raíz cuadrada. En las siguientes ecuaciones aparece mostrado el fallo. La primera ecuación aquí mostrada es la ecuación correcta, sin embargo, en el software FLG se utilizaba la segunda.

$$c_s = \frac{\pi}{4} * \sqrt{1 - 0,75 * (0,5 * \delta_Q + \delta_R)^2} + j_s * (0,5 * \delta_R - 0,75 * \delta_Q)$$

$$c_s = \frac{\pi}{4} * \left(\sqrt{1 - 0,75 * (0,5 * \delta_Q + \delta_R)^2} + j_s * (0,5 * \delta_R - 0,75 * \delta_Q) \right)$$

Debido a este error, los cálculos del caso 2 quedan ligeramente diferentes en Python respecto los cálculos de FLG, siendo los de Python los correctos. En el resto de casos este fallo se encuentra corregido ya que esta errata fue comunicada al creador del programa y posteriormente solucionada.

La realización de diferentes casos ha servido para poder comprobar que el programa funcionase correctamente en todas y cada una de sus partes. Es importante hacer esta comprobación debido a que dependiendo del tipo de brida las ecuaciones a

emplear van a ser diferentes y si, por ejemplo, no se hubiera realizado ningún calculo con una brida integral, no se habría detectado el fallo.

En definitiva, se considera que los objetivos han sido alcanzados, demostrando y obteniendo los valores deseados en cada una de las variables. Además de esto, se ha encontrado y solucionado un fallo en el programa de referencia.

4.2. Trabajo futuro

En la introducción de este trabajo se ha comentado la variedad de factores que influyen en la tasa de fugas de la brida pero que, pese a conocerlos (la presión del fluido transportado, la temperatura, la masa molar y la viscosidad del gas y las características de la junta de estanquidad) no hay una forma clara y concisa de cuantificarlos y demostrar su importancia real en las fugas.

Por esta razón, propongo como trabajo futuro desarrollar un modelo que identifique y cuantifique cuales de estas variables son las más influyentes y cuál es su grado de relevancia concreto sobre la tasa de fugas.

Para poder realizar este modelo, antes de intentar analizar cada una de estas variables, habría que realizar una amplia obtención de datos en diferentes situaciones reales y con una gran variedad de juntas de estanquidad, utilizando todos los materiales posibles para fabricarlas, y diferentes tipos de bridas. Esto se podría hacer mediante experimentos, lo cual sería muy costoso tanto en tiempo como en recursos, o mediante simulaciones por elementos finitos con programas informáticos como por ejemplo Ansys.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] – Norma UNE-EN 1591-1:2013. Bridas y sus uniones. Reglas de diseño de las uniones de bridas circulares con junta de estanquidad. Parte 1: Cálculo.
- [2] – E.V. Browell, S. Ismail, W.B. Grant. LIDAR | DIAL. Encyclopedia of Atmospheric Sciences [Internet]. 2002 [citado 4 junio 2021]; 1183-1194. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B0122270908002049>
- [3] – P. Lošák, T. Létal, M. Nad', M. Pernica. Tightness of flange joints: A case study. IOP Conf. Ser. [Internet]. 2020; 776. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/776/1/012037/meta>
- [4] – Envirotech-online.com: What Are Fugitive Emissions? [Internet]. Hertfordshire, United Kingdom: Envirotech. 2015 [citado 5 junio 2021]. Disponible en: <https://www.envirotech-online.com/news/health-and-safety/10/breaking-news/what-are-fugitive-emissions/36064>
- [5] – Y. Cheng, X.T. Zheng, J.Y. Yu, J.M. Xu, C.G. Wang, W. Lin. Tightness Assessment of Bolted Flange Connections Considering the Creep Effect of Gasket. Procedia Engineering [Internet]. 2015 [citado 4 junio 2021]; 130: 221-231. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815040989>
- [6] – Administrador CDTdeGAS. Detección de Emisiones Fugitivas. 31 enero 2014 [citado 15 mayo 2021] [31 segundos]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=wWQfuznRh4>
- [7] – Administrador CDTdeGAS. Detección de Emisiones Fugitivas. 31 ene 2014 [citado 15 mayo 2021] [28 segundos]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=luCluRoGdbs>
- [8] – Gasketdata.org [Internet]. Münster: University of Applied Sciences in Münster/Germany. [actualizado 19 mayo 2019; citado 6 junio 2021]. Disponible en: <http://gasketdata.org/index.php?p=1&lang=en>
- [9] – Dnbrida.com. Proveedor de bridas standard, bridas especiales, todos los tamaños y materiales [Internet]. Barcelona: Dnbrida. [citado 6 junio 2021]. Disponible en: <http://www.dnbrida.com/sobre-dnbrida.php>
- [10] – Red-bag.com: Engineering Consultancy Software [Internet]. Rotterdam: Red-Bag BV. [actualizado 6 noviembre 2020, citado 3 junio 2020]. Disponible en: <https://www.red-bag.com/es/>
- [11] – Norma ASME/ANSI B16.5. Bridas para tubería y accesorios bridados de NPS 1/2 a NPS 24 Métrico/Pulgadas Standard.
- [12] – Climate-chance.org [Internet]. Paris: Climate-Chance. [citado 9 junio 2021]. Disponible en: <https://www.climate-chance.org/en/card/fugitive-emissions-blind-spot-fight-against-climate-change/>

ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMA FLG

Los cálculos se han realizado con el **programa FLG** de la empresa Red-Bag [10]. Como podemos observar en la primera de las imágenes y, posteriormente se va a observar en las sucesivas, es muy útil ya que además de ver claramente todos los valores y sus unidades, vemos también un dibujo de la pieza que estamos diseñando y/o seleccionando.

Antes de empezar a analizar todas las variables de entrada, es importante comentar que la brida que sale impresionada es solamente un ejemplo para que queden más claras todas estas entradas.

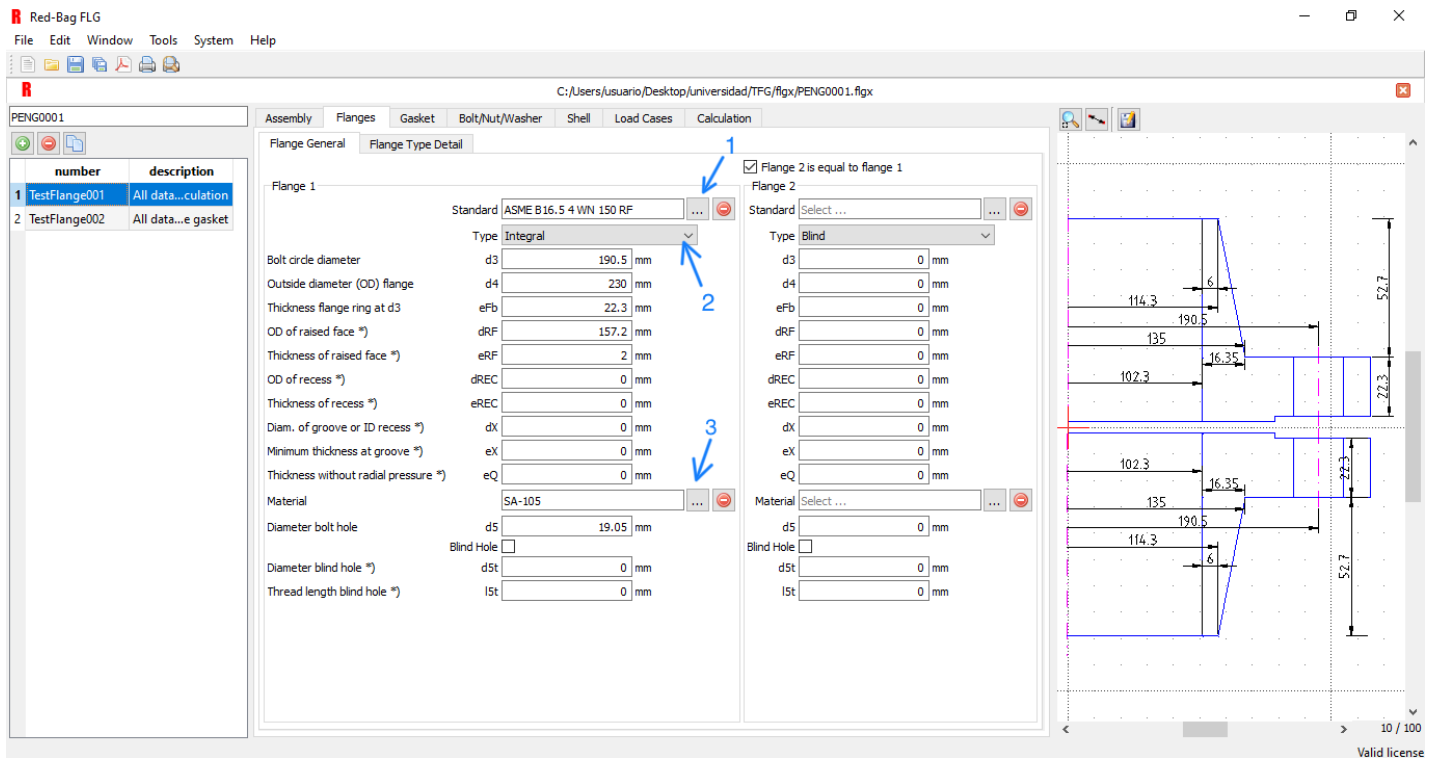


Imagen A.1. Ventana 'Flange General'

En la primera foto se encuentra la pestaña '**Flange general**', en la cual hay que seleccionar tres variables que, una vez escogidas, el resto de valores entrarán por defecto. El primero de ellos es el que indica el **estándar** de la brida y que lleva a una pantalla diferente (imagen A.2) que más adelante se explicará más detalladamente. Una vez escogida este tipo de brida tendremos ya todas las demás variables.

La segunda variable de entrada es la llamada '**Type**' en la cual tenemos que elegir entre los tres tipos principales de brida que hay, en la introducción se encuentran los tres explicados más en detalle, que son '*Integral*', '*Blind*' y '*Loose*'. Una vez seleccionado estos dos parámetros, el dibujo ya se mostrará, ya que la última variable a introducir en esta pestaña es el **material** de la brida.

Este ejemplo está hecho en el supuesto caso de que ambas bridas fueran iguales, pero si fueran diferentes entre ellas, simplemente habría que desmarcar la opción '*Flange 2 is equal to flange 1*' y seguir los mismos pasos que para la primera brida.

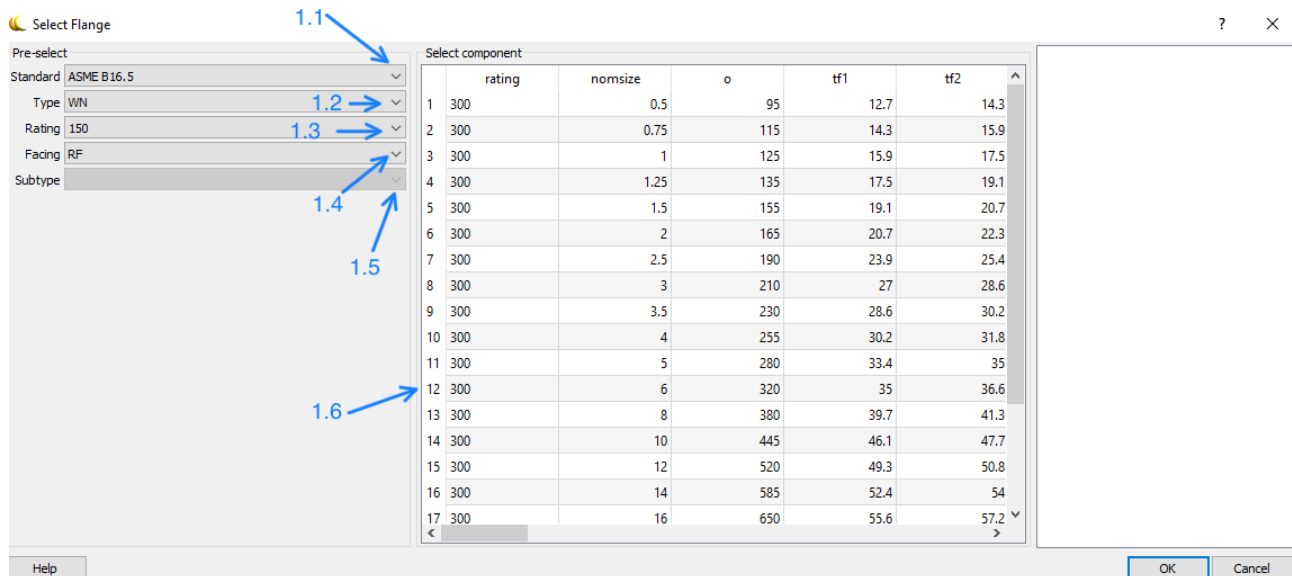


Imagen A.2. Ventana 'Select Flange'

La siguiente imagen muestra la pestaña que se abre para seleccionar el **tipo de brida** que se desea. En esta pantalla primeramente tenemos que elegir la norma que va a seguir, seguidamente y dependiendo de cuál hayamos seleccionado, la **forma de la brida**, el **'rating'** y el **tipo de cara inferior** que tiene. Una vez seleccionados todos estos parámetros, el siguiente paso es escoger las medidas correspondientes en la tabla de la parte de derecha que, cambiante el **'rating'** las medidas cambiarán también.

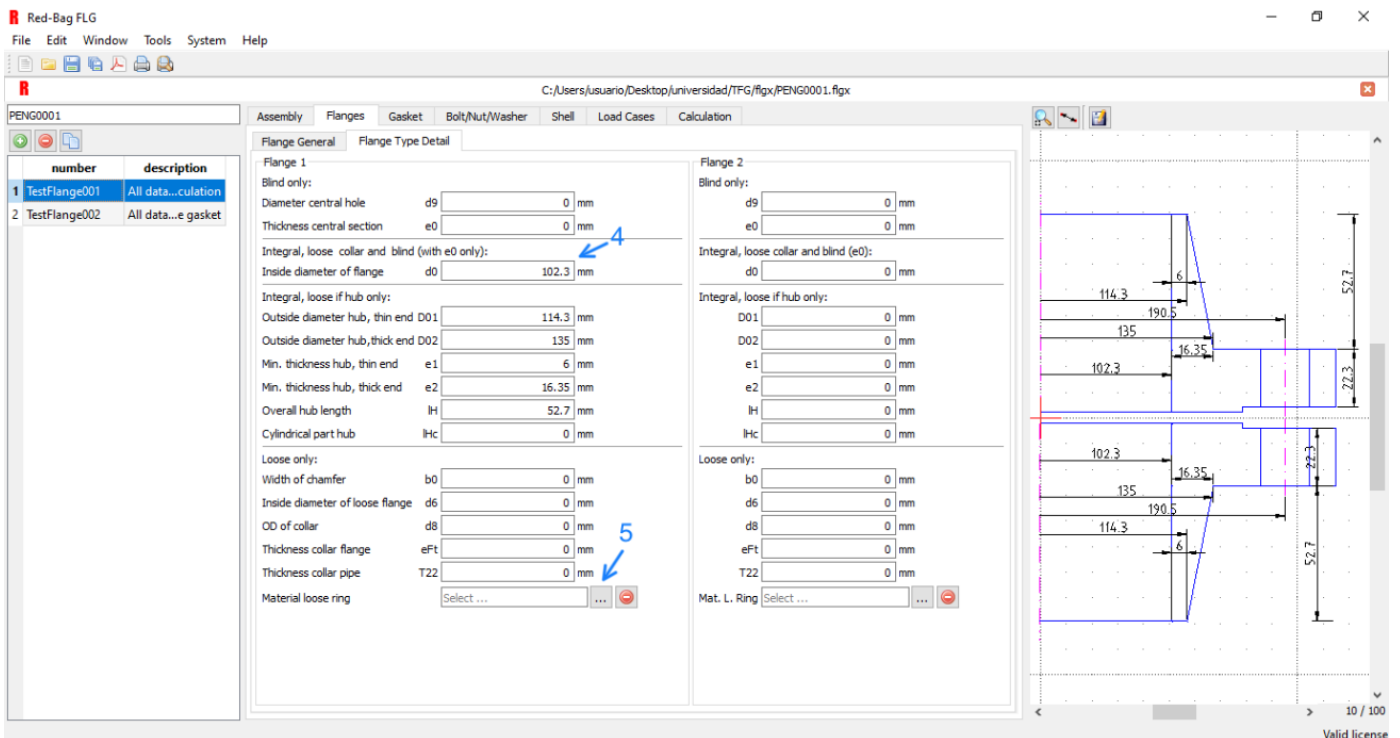


Imagen A.3. Ventana 'Flange Type Detail'

Como anteriormente se ha señalado, el dibujo aparecerá ya en la parte derecha de la pantalla debido a que la brida ya estará escogida, sin embargo, la cuarta entrada a introducir (si se desea cambiar) o a verificar será el **diámetro interior de la brida, d0**, el cual, al variarlo, modificará el dibujo al instante, este valor se observa en la Imagen A.3. En el caso de que la brida se tratase de una brida loca, habría que introducir los valores y el material en el apartado con el nombre de 'Loose only'. Con todos estos valores definidos, la brida queda concretada.

Este apartado es el correspondiente a la **junta de estanquidad**. Como en la brida, la primera de las entradas es seleccionar las medidas de estas. Aparece una pantalla parecida a la imagen A.2, pero con alguna diferencia. En esta hay que seleccionar primeramente el **estándar**, seguidamente el **tipo** y el **'rating'**; por último, se ha de seleccionar las medidas de la junta en la parte de la derecha, exactamente igual que en las bridas.

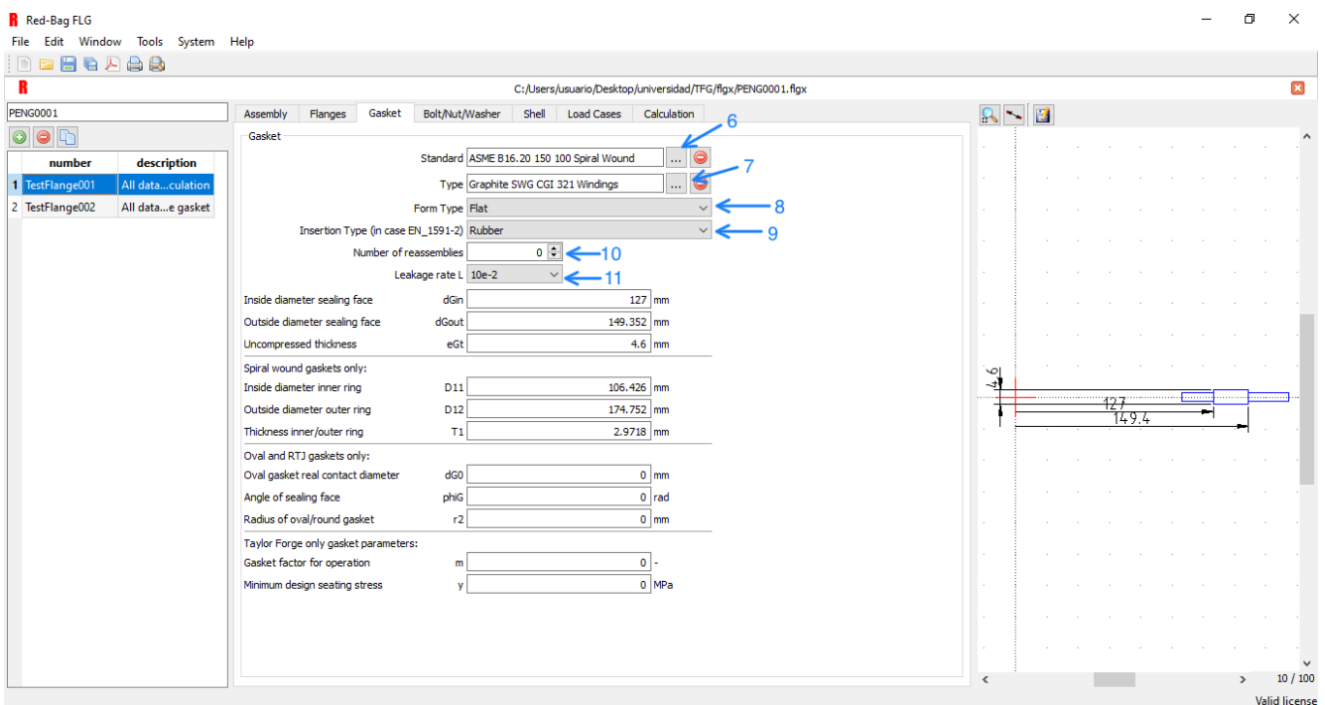


Imagen A.4. Ventana selección 'Gasket'

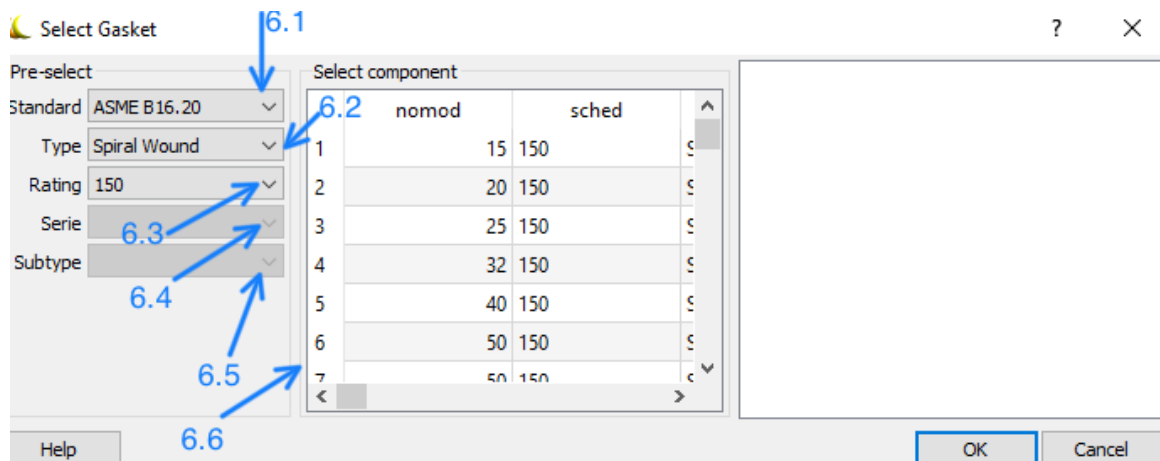


Imagen A.5. Ventana 'Select Gasket'

Una vez elegido el tipo de brida, el siguiente paso es elegir el proveedor de esta en la pestaña ‘type’ y, como se ve en la imagen A.6, aparece la empresa y el enlace a la página de esta.

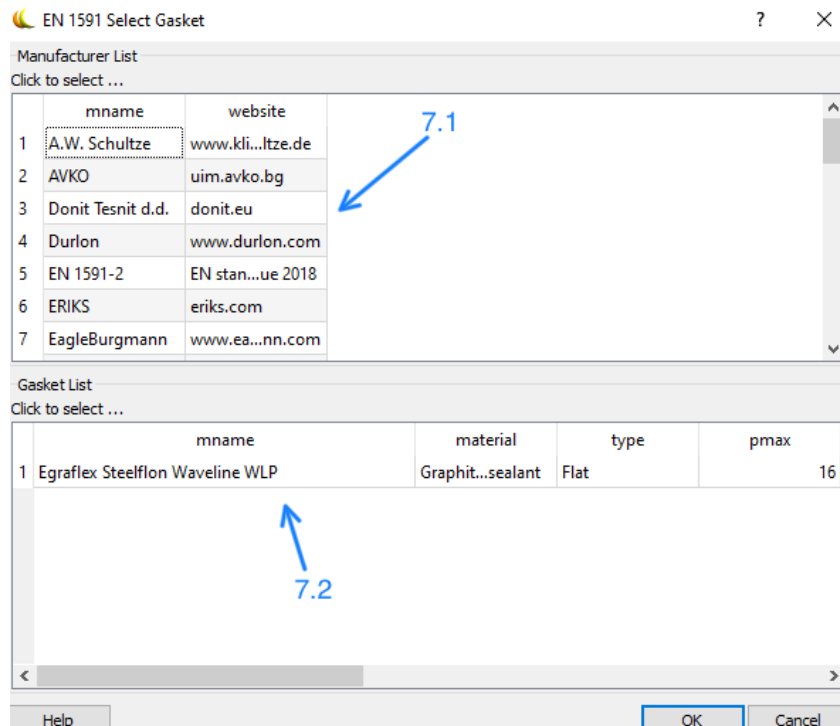


Imagen A.6. Ventana elección proveedor junta

En ‘**form type**’ se escoge el tipo de junta, pero solo para fines del dibujo, por lo que no va a tener influencia en el cálculo de la unión.

‘**Insertion Type**’ depende de si se introduce o no un valor de fuga, en el caso de que se haya introducido una no es necesario. Si no se introduce ningún valor de fuga, los dos últimos valores, ‘m’ e ‘y’ han de definirse.

Los últimos dos valores a introducir son los números 10 y 11. Respecto al **número de reensamblajes** para la determinación de la deformación plástica, si el valor es cero, que es el que aparece predeterminado, lo que indica es que no es aplicable la reutilización o el reensamblaje. Y ya por último hay que introducir la **tasa de fugas**, es valor se introduce como el exponente negativo de L.

En el caso de que la junta de estanquidad fuera oval o del tipo RJT, sería necesario introducir los tres valores que aparecen en la parte de abajo.

Los siguientes elementos a definir son **los pernos, tuercas y arandelas** en el caso de que las haya.

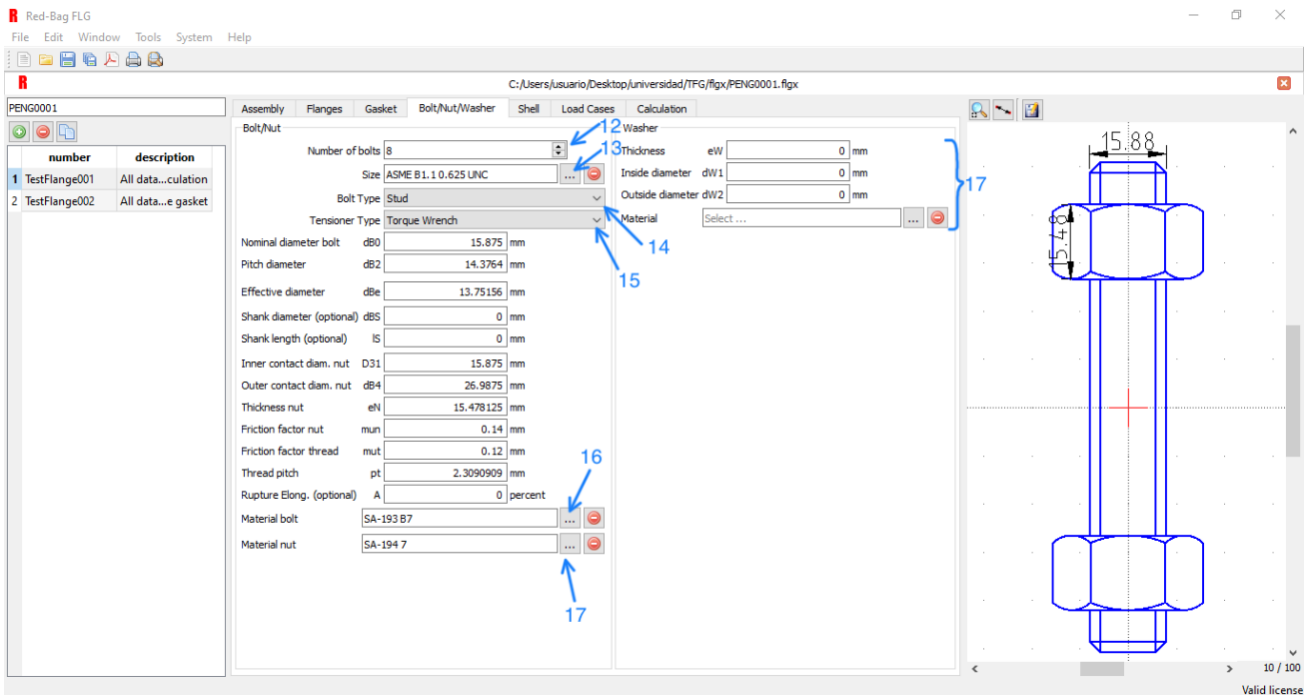


Imagen A.7. Ventana selección perno, tuerca y arandela

En cuanto a los pernos, el primer valor a determinar es el **número de pernos** que hay en la brida. Lo siguiente es determinar el **tipo de perno**, aquí aparece una ventana muy similar a la que aparece al tener que elegir el tipo de brida y el tipo de junta de estanquidad.

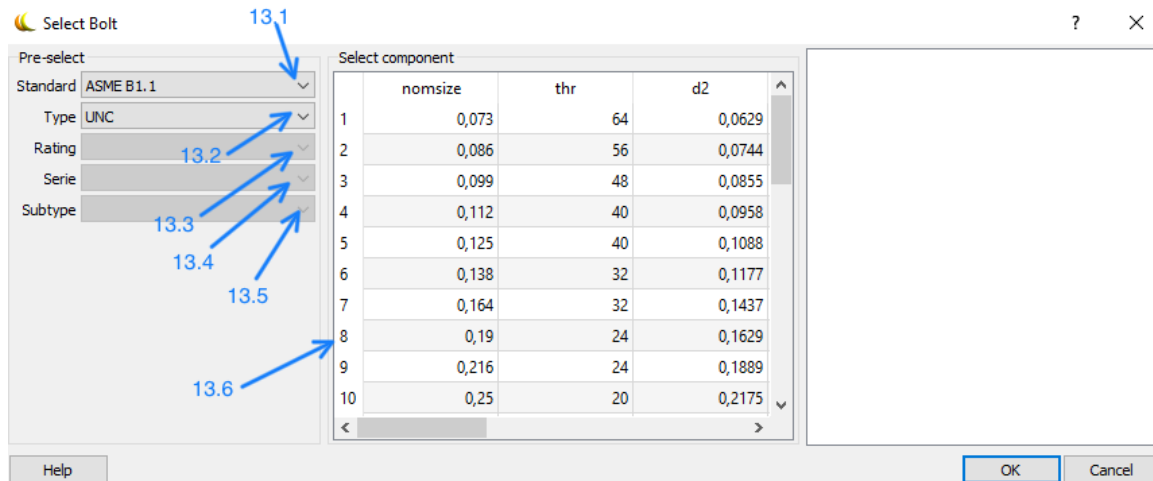


Imagen A.8. Ventana 'Select Bolt'

Los dos últimos valores a introducir para definir los pernos son **'bolt type'** y **'tensioner type'**. En **'bolt type'** se ha de elegir si el perno es con cabeza o sin cabeza. Por último, en **'tensioner type'** se selecciona el método de apriete de los pernos, estos son variados, sin embargo, los más típicos son el apriete manual, mediante llave dinamométrica o mediante tensor hidráulico.

Para la **tuerca** solo hace falta definir el **material** del que va a estar fabricada, ya que sus dimensiones vienen determinadas por el perno, para el cual también hay que seleccionar el tipo de material, esto se hace en las entradas 16 y 17.

Como se ha comentado anteriormente, las **arandelas** son unos componentes que no son siempre necesarios. En el ejemplo seleccionado para marcar las entradas vemos que no hay arandela, pero, en el que caso de que fueran deseadas o más tarde se quisieran introducir, simplemente hay que meter su **grosor**, sus **diámetros interior y exterior** y el **material** del que está fabricada.

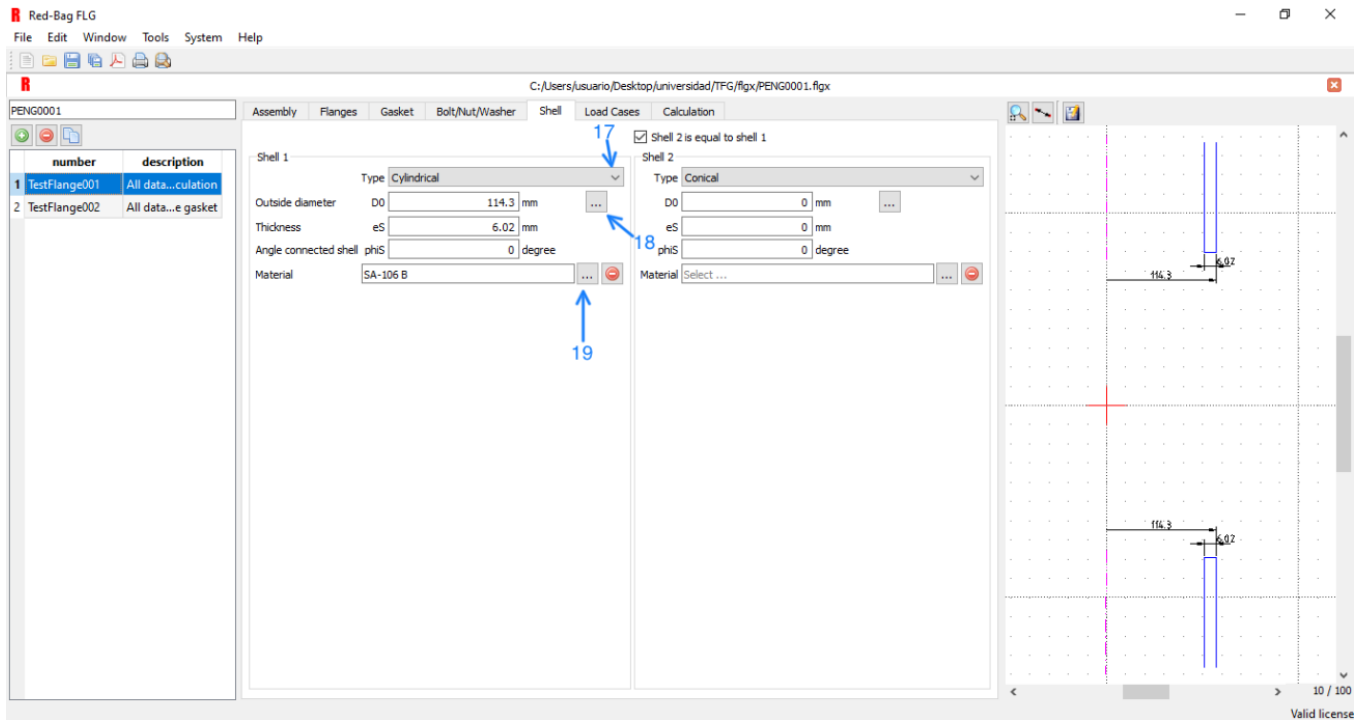


Imagen A.9. Ventana selección corona

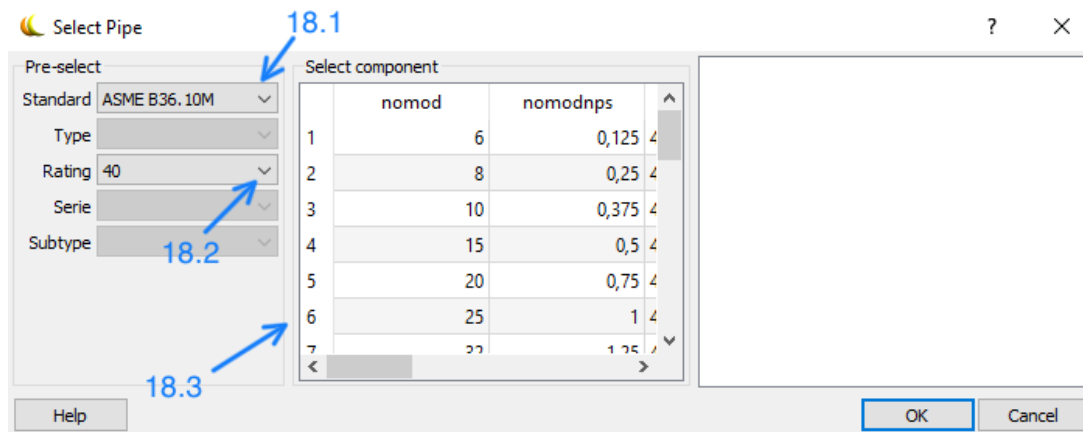


Imagen A.10. Ventana 'Select Pipe'

La **carcasa** es el último componente que hay que definir. Como con las bridas, en este ejemplo la segunda carcasa es igual a la primera y, en el caso de que no lo fuera, simplemente habría que definirla con sus medidas.

El primer valor a definir para las carcassas es su **tipo**, hay que seleccionar entre cónica, cilíndrica o esférica. Seguidamente a esta selección viene la determinación de sus medidas, **diámetro medio de la carcassa** y el **espesor de la pared**. Estos valores se pueden introducir a mano o seleccionándolos en la imagen A.10. como en las piezas anteriores. Finalmente se selecciona el **material de la carcassa**.

Una vez definidos todos estos valores, la brida quedaría determinada y dibujada por completo. Como ya se ha ido viendo en la ventana de cada componente vemos el dibujo de esta en la parte derecha de la pantalla, sin embargo, si queremos ver la pieza en su totalidad es posible hacerlo en la ventana **'Assembly'**.

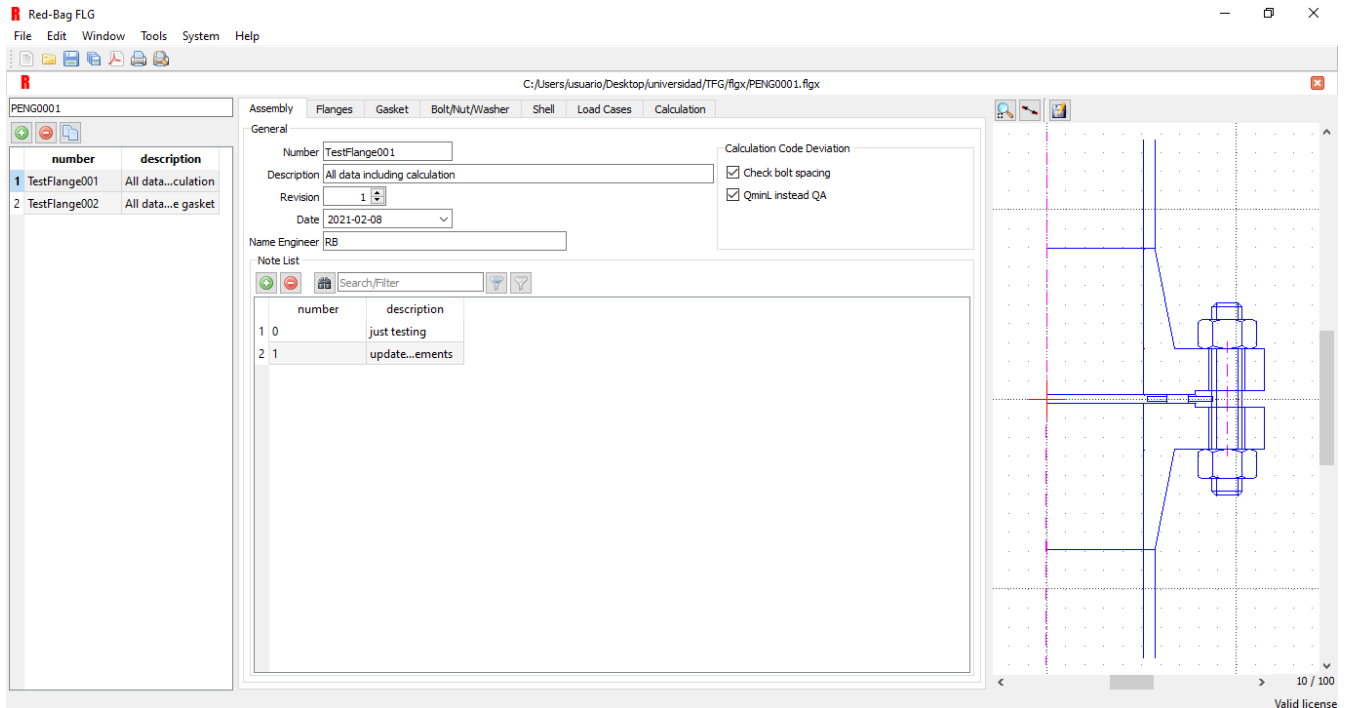


Imagen A.11. Ventana 'Assembly' dibujo completo

Esta función resulta muy útil ya que, ante un error al introducir alguno de los componentes, se puede identificar con mucha facilidad.

Finalmente queda por definir las condiciones de cada uno de los **escenarios de carga**. El primer caso hace referencia a la condición de montaje ($I=0$), la siguiente a la condición de prueba o test ($I=1$) y ya las sucesivas a los diferentes casos de carga; generalmente suelen realizarse dos casos más aparte de estos dos.

Además de la introducción de las temperaturas de cada una de las piezas, hay que introducir la presión en cada uno de los casos (en la condición de montaje la presión siempre es cero y la temperatura es uniforme a 20°C) y la temperatura del fluido y de la junta en general, si la temperatura es uniforme, T_0 .

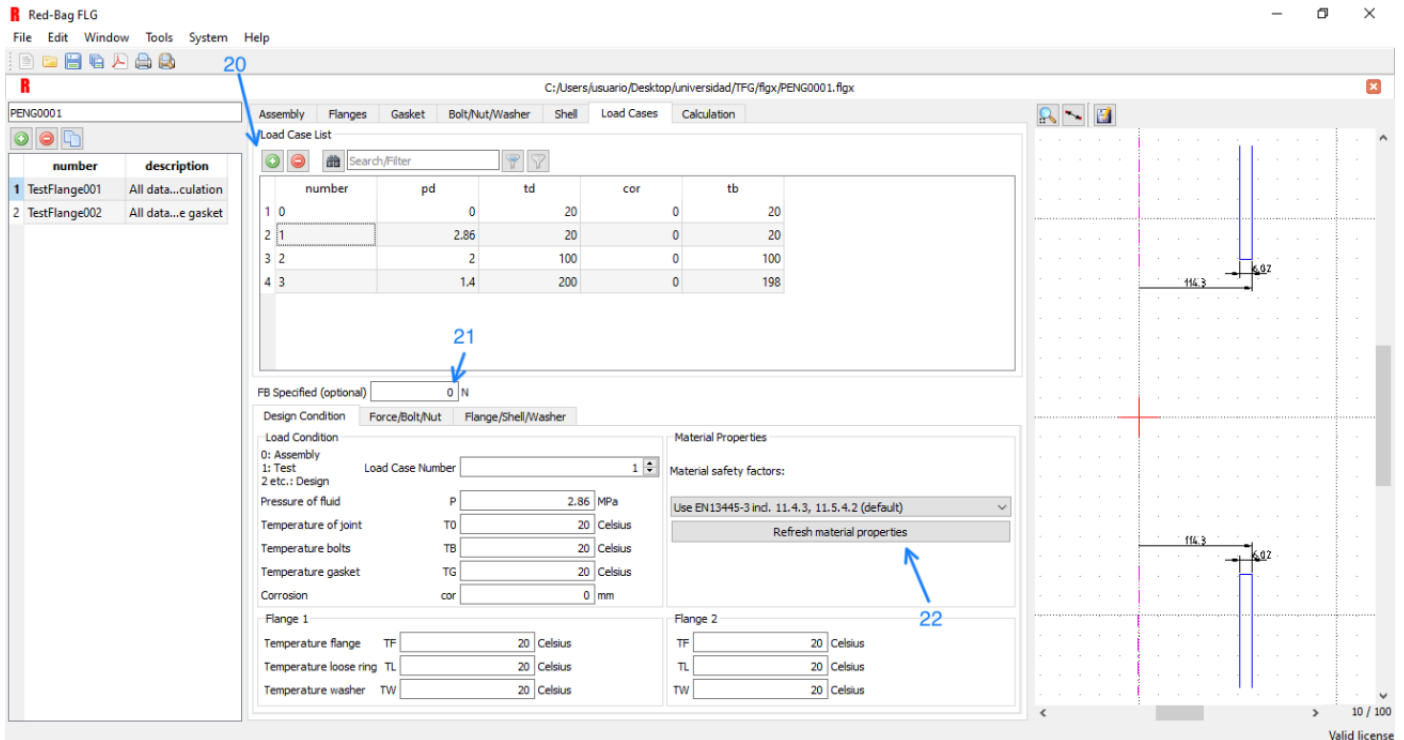


Imagen A.12. Ventana casos de carga

En cuanto a la entrada 21, esta hace referencia a una **fuerza sobre el perno específica**. Esta fuerza se utiliza para una primera aproximación en la fuerza de apriete, en el caso de que sea cero el programa utiliza una formula diferente para calcularlo, como ocurre en este ejemplo, esto se encuentra explicado en el bloque 2 de la descripción del programa informático.

Es imprescindible pulsar la entrada 22, su función es actualizar los valores de los materiales que se muestran en las figuras sucesivas, A.13 y A.14. Estos valores son imprescindibles y específicos para cada material, por lo que es muy importante una correcta selección de este para cada uno de los componentes. En el supuesto de que una vez actualizado estas propiedades se cambiase alguno de los materiales de algún componente, sería necesario volver a pulsar en **'Refresh material properties'** para que estos valores se cambiasen.

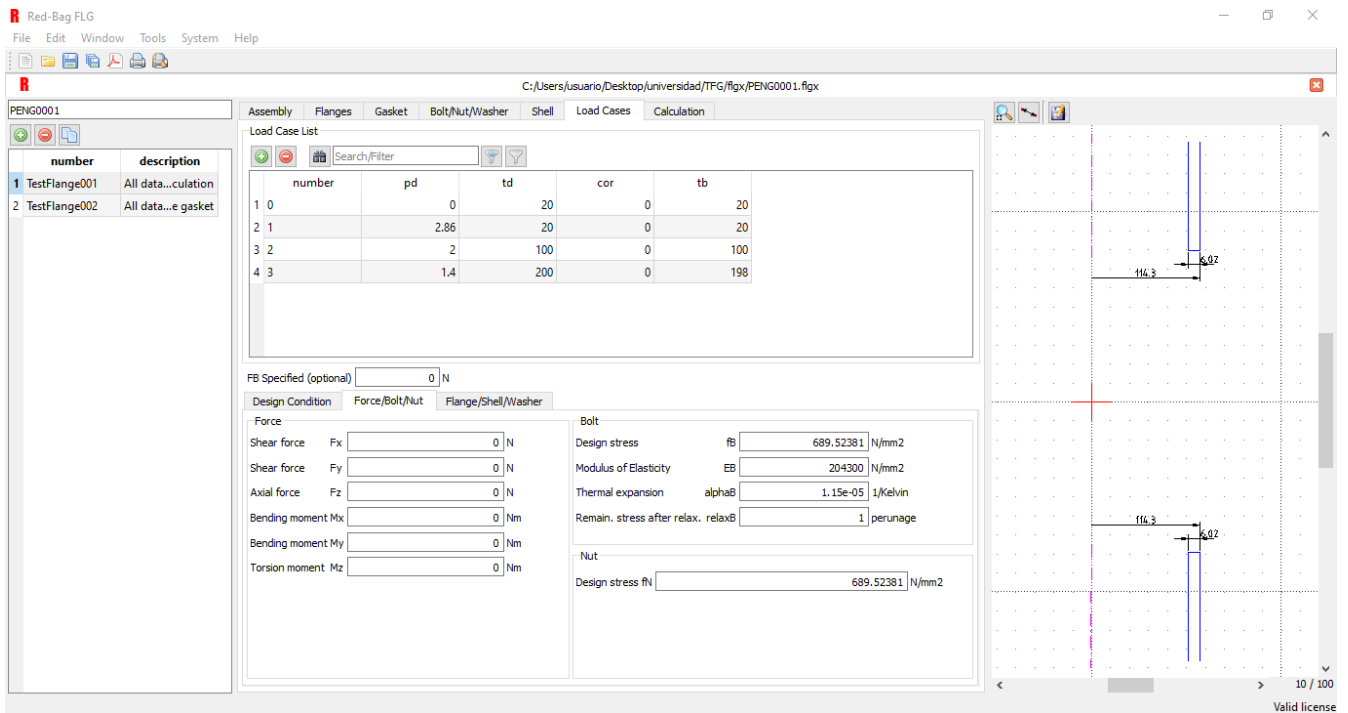


Imagen A.13. Ventana selección fuerzas y momentos exteriores

En la imagen A.13 se encuentran las entradas donde, en el caso de que las haya, se introducen las fuerzas exteriores en cada uno de los ejes y los momentos. El valor llamado '**relaxB**' corresponde al estrés restante después de la relajación, este hace referencia a un porcentaje, por lo que, el valor de 1 corresponde al 100%.

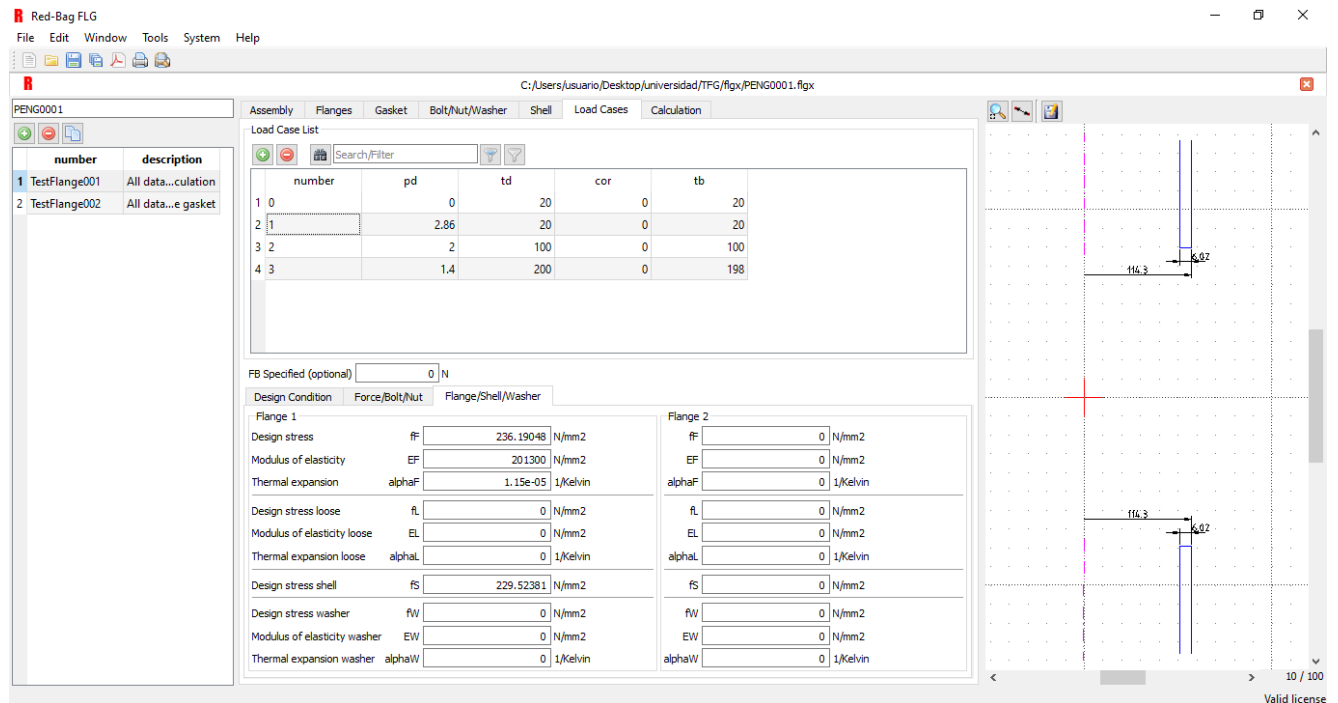


Imagen A.14. Ventana propiedades componentes

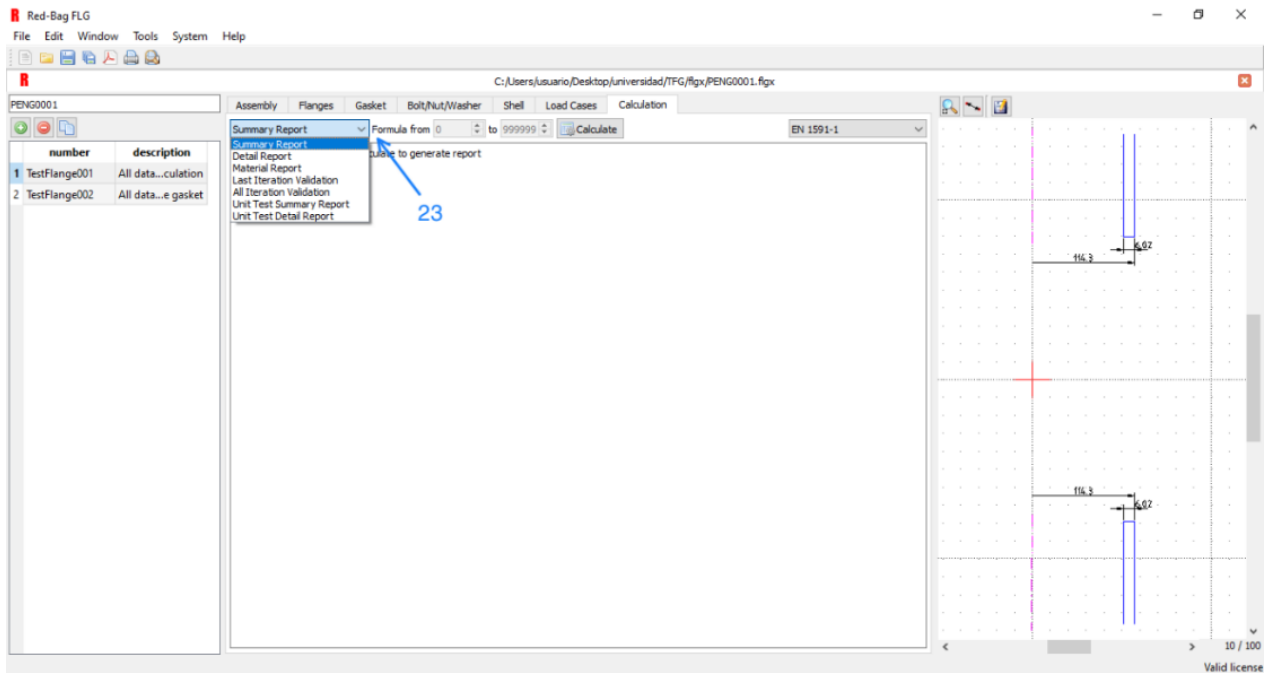


Imagen A.15. Ventana 'Calculation'

Una vez introducido todos los datos, el paso final es obtener los resultados. Como se puede ver en la imagen A.15, hay diferentes formas de obtenerlos, pero las más importantes son:

- **'Summary Report':**

Summary Report		Formula from 0 to 999999		Calculate		EN 1591-1	
allow. str. bolt	f_b	689,524	689,524	359,167	359,167 MPa		
leak rate (all cond.) $L(10E-x)$	x	2			mg/sm		
Output Results							
Assembly Settings							
nominal torque	M_{Lnom}	56,760,1	-	-	-Nmm		
bolt elongation	Δl_B	0,0409893	-	-	-mm		
nominal bolt force	F_{B0nom}	158.617	-	-	-N		
check min. bolt force	$F_{B0min} \geq F_{B0req}$	1	-	-	--		
Check of Leakrate							
gasket mod. of elast.	E_G	1.641	1.641	1.983,22	2.406,72 MPa		
gasket compr. thickn.	e_G	4,365	-	-	-mm		
gasket stress	Q_G	30	20	22,8475	24,9529 MPa		
min. req. gasket stress	Q_{minL}	30	-	-	-MPa		
min. req. str. subs. cond.	Q_{minL}	-	20	20	20 MPa		
check min. req. g. stress:	$Q_{min} > Q_{G(minL)}$	1	1	1	1-		
Check of Load Ratio							
bolt load ratio	Φ_B	0,25419	0,170778	0,330009	0,332861-		
gasket load ratio	Φ_G	0,176949	0,1	0,114237	0,124764-		
flange 1 load ratio	Φ_F	0,16866	0,162244	0,244359	0,253121-		
flange 2 load ratio	Φ_F	0,16866	0,162244	0,244359	0,253121-		
loose ring 1 load ratio	Φ_L				-		
loose ring 2 load ratio	Φ_L				-		
Flange 1 Rotation							
min. flange rotation	Θ_{Fmin}	0,049561	0,0623867	0,0620973	0,0631615 °		
max. flange rotation	Θ_{Fmax}	0,0584652	0,0712018	0,0717158	0,0736448 °		
min. loose ring rotation	Θ_{Lmin}	0	0	0	0 °		
max. loose ring rotation	Θ_{Lmax}	0	0	0	0 °		
Flange 2 Rotation							
min. flange rotation	Θ_{Fmin}	0,049561	0,0623867	0,0620973	0,0631615 °		
max. flange rotation	Θ_{Fmax}	0,0584652	0,0712018	0,0717158	0,0736448 °		
min. loose ring rotation	Θ_{Lmin}	0	0	0	0 °		
max. loose ring rotation	Θ_{Lmax}	0	0	0	0 °		
Overall assessment							
Calculation assessment	Overall assessment OK						

Imagen A.16. 'Summary Report'

En esta pantalla se obtienen los resultados más importantes sin saber los valores intermedios. También aparecen en la parte superior alguno de los valores de entrada, pero no todos los suficientes para poder repetir el cálculo.

- **‘Detail Report’:**

Detail Report	Formula from 0 to 999999	Calculate	EN 1591-1
torsion moment	M_z	0	0 Nmm
leak rate (all cond.) $L(10E-x)$	x	2	- mg/sm
Calculation			
Flange Parameters			
		flange 1	flange 2 unit
pitch between bolts	p_B	74,8092	74,8092 mm
eff. diameter of bolt hole	d_{se}	9,61313	9,61313 mm
eff. bolt circle diameter	d_{se}	184,547	184,547 mm
cross-section area of flange ring	A_F	1.478,76	1.478,76 mm ²
cross-section area of loose flange ring	A_L	0	0 mm ²
eff. width of flange ring	b_F	54,2369	54,2369 mm
eff. diameter of flange ring	d_F	166,15	166,15 mm
part of flange with radial pressure	e_p	23,1598	23,1598 mm
equiv. wall thickness for flexibility	e_E	13,1907	13,1907 mm
validity flange dimensions (par. 4.2)	β	1	1 -
intermediate variable	β	2,725	2,725 -
mean diameter shell	d_E	115,491	115,491 mm
lever arm correction	h_p	11,0958	11,0958 mm
lever arm	h_G	23,1854	23,1854 mm
lever arm	h_H	34,5281	34,5281 mm
lever arm	h_L	0	0 mm
intermediate variable	γ	0,349885	0,349885 mm
intermediate variable	θ	0,926903	0,926903 -
intermediate variable	λ	0	0 -
intermediate variable	ρ	-	-
intermediate variable (Loose only)	χ	-	-
reaction diameter (Loose only)	d_{r0}	-	mm
correction factor	c_F	0,219121	0,219121 -
lever arm correction	h_S	12,5273	12,5273 mm
lever arm correction	h_T	12,2312	12,2312 mm
lever arm correction	h_Q	12,3691	12,3691 mm
lever arm correction	h_R	-1,8791	-1,8791 mm
correction factor	k_Q	0,85	0,85 -
correction factor	k_R	-0,15	-0,15 -
rotational flexibility modulus of flange	Z_F	5,16007e-05	5,16007e-05 1/mm ³
rotational flex. mod. of loose flange	Z_L	0	0 1/mm ³

Imagen A.17. 'Detail Report'

En el caso de que se desee saber los resultados de las variables intermedias y los todos los valores de entrada, esta opción es la más adecuada. El inconveniente de esta solución es que resulta más complicado localizar los valores más importantes.

- **'Last Iteration Validation':**

Last Iteration Validation		Formula from	0	to	999999	Calculate	EN 1591-1
Before_F. 39 [-1]	dB _S =	13.75156	= dB _e				
Before_F. 121 B.7/9 [-1]	dn =	21.43125	= 13.7516				
Formula 1 [-1]	pB(1) =	74.80917506360694	= (dB ₀ + dB ₄) / 2				
Formula 1 [-1]	pB(2) =	74.80917506360694	= (15.875 + 26.9875) / 2				
Formula 2 3 [-1]	d5e(1) =	9.613134908896809	= $\pi \cdot d_3 / n_B$				
Formula 2 3 [-1]	d5e(2) =	9.613134908896809	= $\pi \cdot 190.5 / 8$				
Formula 4 [-1]	d3e(1) =	184.546875	= $\pi \cdot d_3 / n_B$				
Formula 4 [-1]	d3e(2) =	184.546875	= $\pi \cdot 190.5 / 8$				
Before_F. 22 [-1]	dG1 =	127	= $d_5 \cdot (d_5 / p_B)^{0.5}$				
Before_F. 49 [-1]	dG2 =	149.352	= $19.05 \cdot (19.05 / 74.8092)^{0.5}$				
Formula 5 [-1]	bF(1) =	54.23686509110319	= $d_5 \cdot (d_5 / p_B)^{0.5}$				
Formula 5 [-1]	bF(2) =	54.23686509110319	= $d_5 \cdot (d_5 / p_B)^{0.5}$				
Formula 7 [-1]	dF(1) =	166.15	= $19.05 \cdot (19.05 / 74.8092)^{0.5}$				
Formula 7 [-1]	dF(2) =	166.15	= $d_3 \cdot (1 - 2 / (n_B \cdot n_B))$				
Formula 6 [-1]	bl(1) =	0	= $190.5 \cdot (1.0 - 2.0 / (8 \cdot 8))$				
Formula 6 [-1]	bl(2) =	0	= $d_3 \cdot (1 - 2 / (n_B \cdot n_B))$				
Formula 6 [-1]	dl(1) =	0	= $190.5 \cdot (1.0 - 2.0 / (8 \cdot 8))$				
Formula 6 [-1]	dl(2) =	0	= $\max(d_0(2), \max(d_0(1), d_{Gin}))$				
			= $\max(102.3; \max(102.3; 127))$				
			= $\min(d_{rf}(2), \min(d_{rf}(1), d_{Gout}))$				
			= $\min(157.2; \min(157.2; 149.352))$				
			= $(d_4 - d_0) / 2 - d_{5e}$				
			= $(230 - 102.3) / 2 - 9.61313$				
			= $(d_4 - d_0) / 2 - d_{5e}$				
			= $(230 - 102.3) / 2 - 9.61313$				
			= $(d_4 + d_0) / 2$				
			= $(230 + 102.3) / 2$				
			= $(d_4 + d_0) / 2$				
			= $(230 + 102.3) / 2$				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				
			= 0				

Imagen A.18. 'Last Iteration Validation'

Esta es la última de las tres opciones de cálculo más importantes. En este caso, su característica principal es que se puede observar como el programa ha ido realizando las operaciones y las fórmulas de la norma empleadas para realizarlo.

ANEXO B. PROGRAMA PYTHON

En el presente anexo se muestra el código desarrollado en Python, este se ha dividido en los mismos bloques que se ha explicado anteriormente.

B.1. Bloque 1

```
import math

#Entradas de tipo de brida, etc.
tipo_brida1 = 'Brida loca'
tipo_brida2 = 'Brida loca'
Collarin = True

tipo_seccion_junta = 'Junta plana'
if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
    tipo_material_junta = 'No metalica'
tipo_apriete = 'Llave dinamometrica'
tipo_carcasa = 'Carcasa cilindrica'
arandela = True
tipo_campana = 'Brida acampanada conica'

#Brida 1
d_3 = 298.5          #Diámetro del círculo del perno, brida 1
e_Fb = 37            #Espesor del anillo de la brida en el
diámetro d_3, brida 1
d_4 = 345            #Diámetro exterior de la brida 1
e_RF = -12.6
d_RF = 269.9
d_X = 0              #Diámetro medio de la sección transversal
más débil de la brida 1
e_X = 0              #Espesor de la brida 1 en la sección débil
e_Q = 0
d_0 = 202.7          #Diámetro interior del anillo de la brida
e_1 = 8.2             #Espesor de pared mínimo en el extremo delgado
del extremo acampanado brida 1
e_2 = 10.825         #Espesor de pared en el extremo grueso del
extremo acampanado brida 1
l_H = 0              #Longitud del extremo acampanado brida 1
l_Hc = 0
b_0 = 2              #Anchura del chaflán (o radio) de brida
loca 1
d_6 = 230.2          #Diámetro interior de la brida loca 1
d_8 = 265            #Diámetro exterior del collarín 1
e_Ft = 12.6          #Espesor del anillo de la brida 1 en el diámetro
d_Ge (posición de reacción de la junta de estanquidad)
T_22 = 0
e_Lt = 24.4
e_Lact = 37
```



```

#Brida 2
d_3_ = 298.5          #Diámetro del círculo del perno, brida 2
e_Fb_ = 37            #Espesor del anillo de la brida en el
diámetro d_3, brida 2
d_4_ = 345            #Diámetro exterior de la brida
e_RF_ = -12.6
d_RF_ = 269.9
d_X_ = 0              #Diámetro medio de la sección transversal
más debil de la brida 2
e_X_ = 0              #Espesor de la brida 2 en la sección débil
e_Q_ = 0
d_9 = 0               #Diámetro del orificio central en una brida
ciega
d_5t = 0              #Diámetro del orificio del perno ciego.
e_0 = 0               #Espesor de la pared de la placa central de
una brida ciega dentro del diámetro d_0
d_0_ = 202.7          #Diámetro interior del anillo de la brida
e_1_ = 8.2            #Espesor de pared mínimo en el extremo
delgado del extremo acampanado brida 2
e_2_ = 10.825         #Espesor de pared en el extremo grueso
del extremo acampanado brida 2
l_H_ = 0              #Longitud del extremo acampanado brida 2
l_Hc_ = 0
b_0_ = 2              #Anchura del chaflán (o radio) de brida
loca 2
d_6_ = 230.2          #Diámetro interior de la brida loca 2
d_8_ = 265            #Diámetro exterior del collarín 2
e_Ft_ = 12.6          #Espesor del anillo de la brida 2 en el
diámetro d_Ge (posición de reacción de la junta de estanquidad)
e_Lt_ = 24.4
e_Lact_ = 37

#Junta de estanquidad
d_Gint = 233.426
d_Gext = 263.652
d_1 = 210.9           #Diámetro medio del extremo acampanado,
extremo delgado
d_2 = 213.575         #Diámetro medio del extremo acampanado, ext
remogrueso
d_G0 = 0              #Diámetro de contacto exterior teórico
fi_G = 0              #Ángulo de inclinación de una cara de
sellado
r_2 = 0               #Radio de curvatura en la sección
transversal de la junta de estanquidad.
e_Gt = 4.6            #Espesor inicial teórico de la junta de
estanquidad sin comprimir.

#Perno/Tuerca/Arandela

```

```

n_B = 8                #Número de pernos
d_B0 = 19.05           #Diámetro nominal del perno
d_B2 = 17.399          #Diámetro medio de la rosca
d_Be = 16.7119         #Diámetro útil del perno
d_Bs = 15              #Diámetro del cuerpo del perno
l_S = 20               #Dimensión axial del perno
d_B4 = 31.75           #Diámetro exterior de contacto máximo
posible entre la cabeza o la tuerca del perno y la brida 1 o la
arándela 1
d_B4_ = 31.75          #Diámetro exterior de contacto máximo
posible entre la cabeza o la tuerca del perno y la brida 2 o
arandela 2
e_N = 18.6531          #Espesor de la tuerca.
mu_n = 0.14            #Coeficiente de fricción bajo la tuerca o
la cabeza del perno
mu_t = 0.12            #Coeficiente de fricción sobre la rosca
p_t = 2.54             #Paso de la rosca del perno
A = 0                  #Alargamiento mínimo
e_W = 3                #Espesor de la arandela 1
e_W_ = 3               #Espesor de la arandela 2
d_W1 = 22              #Diámetro interior de la arandela 1
d_W2 = 40              #Diámetro exterior de la arandela 2
d_W1_ = 22             #Diámetro interior de la arandela 2
d_W2_ = 40             #Diámetro exterior de la arandela 2
A_B = ((min(d_Be, d_Bs))**2)*n_B*math.pi / 4    #Sección transversal
de los pernos, fórmula 41

#Shell
e_S = 8.18             #Espesor de la carcasa 1 conectada
e_S_ = 8.18            #Espesor de la carcasa 2 conectada
fi_S = 0               #Ángulo de inclinación de la pared de la
carcasa conectada 1
fi_S_ = 0              #Ángulo de inclinación de la pared de la
carcasa conectada 2

#Load Cases
F_X = [0, 0, 0, 0]     #Fuerzas adicionales eje X
F_Y = [0, 0, 0, 0]     #Fuerzas adicionales eje Y
F_Z = [0, 0, 0, 0]     #Fuerzas adicionales eje Z
M_X = [0, 0, 0, 0]     #Momentos adicionales eje X
M_Y = [0, 0, 0, 0]     #Momentos adicionales eje Y
M_Z = [0, 0, 0, 0]     #Momentos adicionales eje Z
f_B = [689.524, 689.524, 359.167, 359.167] #Esfuerzo nominal perno
P = [0, 1.43, 1, 0.7]  #Presión del fluido. Si P>0 es interior,
P<0 exterior
T_0 = [20, 20, 20, 20] #Temperatura de la unión en el montaje
T_B = [20, 20, 150, 250] #Temperatura perno
T_G = [20, 20, 150, 250] #Temperatura junta
cor = [0, 0, 0, 0]     #Corrosión

```

```

T_F = [20, 20, 150, 250] #Temperatura brida 1
T_F_ = [20, 20, 150, 250] #Temperatura brida 2
T_L = [20, 20, 150, 250] #Temperatura brida loca 1
T_L_ = [20, 20, 150, 250] #Temperatura brida loca 2
T_W = [20, 20, 150, 250] #Temperatura arandela 1
T_W_ = [20, 20, 150, 250] #Temperatura arandela 2
alpha_B = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica perno
relax_B = 1
f_N = [689.524, 689.524, 359.167, 359.167] #Esfuerzo nominal tuerca
f_F = [236.19, 236.19, 146, 136] #Esfuerzo nominal brida 1
f_F_ = [236.19, 236.19, 146, 136] #Esfuerzo nominal brida 2
E_F = [201300, 201300, 194000, 188000]
#Módulo de elasticidad brida 1
E_F_ = [201300, 201300, 194000, 188000]
#Módulo de elasticidad brida 2
alpha_F = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica brida 1
alpha_F_ = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica brida 2
f_L = [236.19, 236.19, 146, 136] #Esfuerzo nominal brida loca 1
f_L_ = [236.19, 236.19, 146, 136] #Esfuerzo nominal brida loca 2
E_L = [201300, 201300, 194000, 188000] #Módulo de elasticidad brida loca 1
E_L_ = [201300, 201300, 194000, 188000] #Módulo de elasticidad brida loca 2
alpha_L = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica brida loca 1
alpha_L_ = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica brida loca 2
f_S = [229.524, 229.524, 142.667, 132] #Esfuerzo nominal 1
f_S_ = [229.524, 229.524, 142.667, 132] #Esfuerzo nominal 2
f_W = [229.524, 229.524, 160.667, 132] #Esfuerzo nominal arandela 1
f_W_ = [229.524, 229.524, 160.667, 132] #Esfuerzo nominal arandela 2
E_W = [202350, 202350, 195000, 189000] #Módulo de elasticidad arandela 1
E_W_ = [202350, 202350, 195000, 189000] #Módulo de elasticidad arandela 2
alpha_W = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica arandela 1
alpha_W_ = [1.15*10**(-5), 1.15*10**(-5), 1.24*10**(-5), 1.3*10**(-5)]
#Coeficiente expansión térmica arandela 2
alpha_G = 10**(-5) #Coeficiente expansión térmica junta
E_B = [204300, 204300, 197000, 190000] #Módulo de elasticidad perno

#Otros valores

```

```

A_F = (d_8-d_0)*e_Fb/2 #Sección transversal radial bruta del anillo
de la brida 1
A_F_ = (d_8_-d_0_)*e_Fb_/2 #Sección transversal radial bruta del
anillo de la brida 1
d_G1 = max(d_0, max(d_0, d_Gint)) #Diámetro de contacto interior
teórico
d_G2 = min(d_RF, min(d_RF, d_Gext)) #Diámetro de contacto real
I_B = (math.pi/12)*(min(d_Be, d_Bs))**3 #Momento de inercia
f_E = f_E_ = [0, 0, 0, 0]
if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        f_E[I] = min(f_F[I], f_S[I]) #Esfuerzo nominal del cilindro
equivalente 1 para el cálculo del límite de carga
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        f_E_[I] = min(f_F_[I], f_S_[I]) #Esfuerzo nominal del cilindro
equivalente 2 para el cálculo del límite de carga
if tipo_brida2 == 'Brida ciega':
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        f_E_[I] = f_F_[I] #Esfuerzo nominal del cilindro equivalente
2 para el cálculo del límite de carga
e_G_Q_G0 = 4.38176 #Espesor inicial de la junta de estanquidad
comprimida bajo la presión de contacto Q_G0
E_G_Q_G0 = [1532.81, 1532.81, 1993.17, 2671.24]
mu_g = 0.25 #Coeficiente de fricción entre la junta de
estanquidad y la cara de la brida
Q_minL = 30 #Nivel mínimo de presión en la superficie de
la junta de estanquidad requerido para la clase de estanquidad L en
el montaje
Q_smin = 20 #Nivel mínimo de presión en la superficie de
la junta de estanquidad requerido para la clase de estanquidad L en
las condiciones de servicio
Q_smax = 200 #Presión máxima en la superficie de la junta
de estanquidad que se puede imponer de forma segura sobre la junta
de estanquidad a la temperatura considerada sin producir daños
P_QR = [0.99, 0.99, 0.971044, 0.953160617990938] #Factor de
fluencia que es la relación entre la presión original y la presión
residual en la superficie de la junta de estanquidad en las
condiciones de carga
d_n = (d_B0 + d_B4)/2 #Diámetro medio de contacto bajo la tuerca
o la cabeza del perno
radToDeg = 360 / (2*math.pi) #Cambio de radianes a grados
N_R = 0 #Número de remontajes y reaprietes durante
la vida útil de la unión
F_Bspec = 0 #Fuerza específica de apriete de los pernos

```

Lo siguiente no está detallado en el diagrama de bloques de la explicación de Python, pero es necesario inicializar a cero todas las listas utilizadas.

```

#Inicializar variables
F_R = [0, 0, 0, 0]
F_G = [0, 0, 0, 0]
F_A = [0, 0, 0, 0]
F_L = [0, 0, 0, 0]
F_Q = [0, 0, 0, 0]
M_A = [0, 0, 0, 0]
M_TG = [0, 0, 0, 0]
DeltaU = [0, 0, 0, 0]
Y_B = [0, 0, 0, 0]
Y_G = [0, 0, 0, 0]
Y_Q = [0, 0, 0, 0]
Y_R = [0, 0, 0, 0]
F_Gmin = [0, 0, 0, 0]
tmpF_Gdelta = [0, 0, 0, 0]
theta_Lmin = [0, 0, 0, 0]
theta_Lmax = [0, 0, 0, 0]
theta_Lmin_ = [0, 0, 0, 0]
theta_Lmax_ = [0, 0, 0, 0]
F_BminA = [0, 0, 0, 0]
F_BmaxA = [0, 0, 0, 0]
F_GminA = [0, 0, 0, 0]
F_GmaxA = [0, 0, 0, 0]
theta_Fmin = [0, 0, 0, 0]
theta_Fmax = [0, 0, 0, 0]
theta_Fmin_ = [0, 0, 0, 0]
theta_Fmax_ = [0, 0, 0, 0]
F_B = [0, 0, 0, 0]
l_5t = [0, 0, 0, 0]
l_5t_ = [0, 0, 0, 0]
c_B1 = [0, 0, 0, 0]
c_B2 = [0, 0, 0, 0]
c_B = [0, 0, 0, 0]
phi_B = [0, 0, 0, 0]
phi_G = [0, 0, 0, 0]
delta_R = [0, 0, 0, 0]
delta_R_ = [0, 0, 0, 0]
delta_Q = [0, 0, 0, 0]
delta_Q_ = [0, 0, 0, 0]
c_M = [0, 0, 0, 0]
c_M_ = [0, 0, 0, 0]
c_S = [0, 0, 0, 0]
c_S_ = [0, 0, 0, 0]
j_M = [0, 0, 0, 0]
j_M_ = [0, 0, 0, 0]
psi_opt = [0, 0, 0, 0]
psi_opt_ = [0, 0, 0, 0]
psi_0 = [0, 0, 0, 0]
psi_0_ = [0, 0, 0, 0]

```

```

psi_max = [0, 0, 0, 0]
psi_max_ = [0, 0, 0, 0]
psi_min = [0, 0, 0, 0]
psi_min_ = [0, 0, 0, 0]
k_M = [0, 0, 0, 0]
k_M_ = [0, 0, 0, 0]
psi_Z = [0, 0, 0, 0]
psi_Z_ = [0, 0, 0, 0]
W_F = [0, 0, 0, 0]
W_F_ = [0, 0, 0, 0]
phi_F = [0, 0, 0, 0]
phi_F_ = [0, 0, 0, 0]
Q_G = [0, 0, 0, 0]
phi_L = [0, 0, 0, 0]
phi_L_ = [0, 0, 0, 0]
theta_F = [0, 0, 0, 0]
c_Sminus1 = [0, 0, 0, 0]
c_Splus1 = [0, 0, 0, 0]
c_Sminus2 = [0, 0, 0, 0]
c_Splus2 = [0, 0, 0, 0]
W_L = [0, 0, 0, 0]
W_L_ = [0, 0, 0, 0]

```

B.2. Bloque 2

```

#Fórmulas B.1 y B.2
epsilon_lplus = 0.16      #Dispersión de la carga inicial en un único
perno, por encima del valor nominal
epsilon_lminus = 0.16     #Dispersión de la carga inicial en un único
perno, por debajo del valor nominal
epsilon_plus = epsilon_lplus * (1 + 3/math.sqrt(n_B)) / 4
#Dispersión de la carga global de todos los pernos, por encima del
valor nominal
epsilon_minus = epsilon_lminus * (1 + 3/math.sqrt(n_B)) / 4
#Dispersión de la carga global de todos los pernos, por debajo del
valor nominal

#6.2.2 ANILLO DE LA BRIDA
#Orificio para los pernos
#Fórmula 3 (separación entre pernos)
p_B = math.pi * (d_3 / n_B)
p_B_ = math.pi * (d_3_ / n_B)
#Fórmula 4 y 5 (diámetro efectivo del orificio para el perno)
d_5 = 22.225
d_5_ = 22.225
d_5e = d_5 * math.sqrt(d_5 / p_B)  #Diámetro efectivo del orificio
para el perno
d_5e_ = d_5_ * math.sqrt(d_5_ / p_B_)

```

```

#Fórmula 6
d_3e = d_3 * (1 - (2 / n_B**2))    #Diámetro útil del círculo de los
pernos
d_3e_ = d_3_ * (1 - (2 / n_B**2))

#Dimensiones efectivas del anillo de la brida
if tipo_brida1 == 'Brida integral':
    #Fórmulas 7, 8, 9, 10
    b_F = ((d_4 - d_0) / 2) - d_5e    #Anchura efectiva de la brida
    b_L = d_L = e_L = 0
    d_F = (d_4 + d_0) / 2            #Diámetro medio de la brida
    e_F = 2 * A_F / (d_4 - d_0)      #Espesor axial útil de la brida
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida ciega':
    b_F_ = ((d_4_ - d_0_) / 2) - d_5e_
    e_L_ = 0
    d_F_ = (d_4_ + d_0_) / 2
    e_F_ = 2 * A_F_ / (d_4_ - d_0_)

if tipo_brida1 == 'Brida loca' and Collarin:
    #Fórmulas 11, 12, 13 para el collarín
    b_F = (d_8 - d_0) / 2            #Anchura efectiva de la brida
    d_F = (d_8 + d_0) / 2            #Diámetro medio de la brida
    e_F = 2 * A_F / (d_8 - d_0)      #Espesor axial útil de la brida
    #Fórmula 14, 15, 16 para la brida
    b_L = ((d_4 - d_6) / 2) - d_5e    #Anchura efectiva de la brida
    loca
    d_L = (d_4 + d_6) / 2            #Diámetro medio de la brida loca
    A_L = (d_4-d_6)*e_Lact/2 + (d_RF-d_6)*e_RF/2
    e_L = 2 * A_L / (d_4 - d_6)      #Espesor axial útil de la brida
    loca
if tipo_brida2 == 'Brida loca' and Collarin:
    b_F_ = (d_8_ - d_0_) / 2
    d_F_ = (d_8_ + d_0_) / 2
    e_F_ = 2 * A_F_ / (d_8_ - d_0_)
    b_L_ = ((d_4_ - d_6_) / 2) - d_5e_
    d_L_ = (d_4_ + d_6_) / 2
    A_L_ = (d_4_-d_6_)*e_Lact_/2 + (d_RF_-d_6_)*e_RF_/2
    e_L_ = 2 * A_L_ / (d_4_ - d_6_)

#6.2.3 CARCASA CONECTADA
#Brida acampanada cónica, fórmulas 17, 18, 19, 20
if tipo_campana == 'Brida acampanada conica':
    beta = e_2 / e_1                #Variable intermedia
    beta_ = e_2_ / e_1_
    e_E = e_1 * (1 + (((beta - 1) * l_H) / ((beta / 3) * math.sqrt(d_1
* e_1) + l_H)))                    #Espesor de pared del cilindro para los
cálculos del límite de carga

```

```

if tipo_brida2 == 'Brida ciega':
    e_E_ = 0
else:
    e_E_ = e_1_*(1+(((beta_ - 1)*l_H_)/((beta_/3)*math.sqrt(d_1 *
e_1_) + l_H_)))
    e_D = e_1_ * (1 + (((beta - 1) * l_H) / (((beta / 3)**4) * (d_1 *
e_1)**2 + l_H**4)**(1/4))) #Espesor de pared del cilindro para los
cálculos del límite de carga
    if tipo_brida2 != 'Brida ciega':
        e_D_ = e_1_ * (1 + (((beta_ - 1) * l_H_) / (((beta_ / 3)**4) *
(d_1 * e_1_)**2 + l_H_**4)**(1/4)))
        d_E = (min(d_1 - e_1 + e_E, d_2 + e_2 - e_E) + max(d_1 + e_1 -
e_E, d_2 - e_2 + e_E))/2 #Diámetro medio del cilindro equivalente
        if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
            d_E_ = (min(d_1 - e_1 + e_E_, d_2 + e_2_ - e_E_) + max(d_1 + e_
_1_ - e_E_, d_2 - e_2_ + e_E_)) / 2
        else:
            d_E_ = d_0_
#Brida no acampanada, fórmulas 21, 22
if tipo_campana == 'Brida no acampanada':
    e_E = e_S
    e_E_ = e_S_
    d_E = d_S
    d_E_ = d_S_

#6.2.4 PARÁMETROS RELATIVOS A LA FLEXIBILIDAD DE LA BRIDA
#Brida integral y collarín, fórmulas 25 a 35
if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    gamma = e_E * d_F / (b_F * d_E * math.cos(fi_S)) #Variable
intermedia
    ipsilon = 0.55 * math.cos(fi_S) * math.sqrt(d_E * e_E) / e_F #
Variable intermedia
    e_P = e_F - e_Q
    Lambda = 1 - (e_P / e_F)
    c_F = (1 + gamma*ipsilon)/(1 + gamma * ipsilon * (4*(1 - 3*Lambda
+ 3*(Lambda**2)) + 6*(1 - 2*Lambda)*ipsilon + 6*(ipsilon**2))+ 3*
gamma**2)*(ipsilon**4)) #Factor de corrección
    h_S = 1.1*e_F*math.sqrt(e_E / d_E)*(1 - 2 * Lambda+ipsilon) / (1 +
gamma * ipsilon) #Corrección brazo de palanca
    h_T = e_F * (1 - 2 * Lambda - gamma * (ipsilon**2)) / (1 + gamma
* ipsilon) #Corrección brazo de palanca
    if tipo_carcasa == 'Carcasa cónica' or 'Carcasa cilíndrica':
        k_Q = 0.85 / math.cos(fi_S) #Factor de corrección
        k_R = -0.15 / math.cos(fi_S) #Factor de corrección
    if tipo_carcasa == 'Carcasa esferica':
        k_Q = 0.35 / math.cos(fi_S)
        k_R = -0.65 /math.cos(fi_S)

```



```

h_R = h_S * k_R - h_T * 0.5 * (math.sin(fi_S) / math.cos(fi_S))
#Corrección brazo de palanca
Z_F = 3 * d_F * c_F / (math.pi * b_F * e_F**3) #Módulo de
flexibilidad rotacional de la brida
Z_L = 0 #Módulo de flexibilidad rotacional de la brida loca
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
    gamma_ = e_E_ * d_F_ / (b_F_ * d_E_ * math.cos(fi_S_))
    ipsilon_ = 0.55 * math.cos(fi_S_) * math.sqrt(d_E_ * e_E_) / e_F_
    e_P_ = e_F_ - e_Q_
    Lambda_ = 1 - (e_P_ / e_F_)
    c_F_ = (1 + gamma_ * ipsilon_) / (1 + gamma_ * ipsilon_ * (4*(1 -
3*Lambda_ + 3*(Lambda_**2)) + 6*(1 - 2*Lambda_)*ipsilon_ +
6*(ipsilon_**2)) + 3*(gamma_**2)*(ipsilon_**4))
    h_S_ = 1.1 * e_F_ * math.sqrt(e_E_ / d_E_) * (1 - 2 * Lambda_ +
    ipsilon_) / (1 + gamma_ * ipsilon_)
    h_T_ = e_F_*(1 - 2 * Lambda_ - gamma_ * (ipsilon_**2))/(1+gamma_
    * ipsilon_)
    if tipo_carcasa == 'Carcasa cónica' or 'Carcasa cilíndrica':
        k_Q_ = 0.85 / math.cos(fi_S_)
        k_R_ = -0.15 / math.cos(fi_S_)
    if tipo_carcasa == 'Carcasa esférica':
        k_Q_ = 0.35 / math.cos(fi_S_)
        k_R_ = -0.65 / math.cos(fi_S_)
    h_R_ = h_S_*k_R_ - h_T_*0.5*(math.sin(fi_S_)/math.cos(fi_S_))
    Z_F_ = 3*d_F_*c_F_ / (math.pi*b_F_*e_F_**3)
    Z_L_ = 0
#Brida ciega, fórmulas 36 a 39
if tipo_brida2 == 'Brida ciega':
    e_P_ = 0
    rho = d_9 / d_E #Relación de diámetros
    h_R_ = (d_E/4) * (1 - rho**2) * (0.7 + 3.3*rho**2) / ((0.7 +
1.3 * rho**2) * (1 + rho**2)) #Corrección brazo de palanca
    Z_F_ = 3 * d_F / (math.pi*(b_F * e_F**3 + d_F * e_0**3 * (1 -
rho**2) / (1.4 + 2.6 * rho**2))) #Módulo de flexibilidad rotacional
de la brida
    Z_L_ = 0 #Brida loca con collarín, fórmula 40
if tipo_brida1 == 'Brida loca' and Collarin:
    Z_L = 3 * d_L / (math.pi * b_L * e_L**3) #Módulo de flexibilidad
rotacional de la brida loca

if tipo_brida2 == 'Brida loca' and Collarin:
    Z_L_ = 3 * d_L / (math.pi * b_L * e_L**3)

#6.3 PARÁMETROS RELATIVOS A LOS PERNOS Y ARANDELAS
#Fórmula 42
l_B = e_Ft + e_Ft_ + e_Lt + e_Lt_ + e_Gt + e_W + e_W_ #Dimensión
axial del perno
l_e = l_B - l_S

```

```

X_B = ((l_S / d_Bs**2) + (l_e / d_Be**2) + (0.8 / d_B0))*4 / (n_B*
math.pi)      #Módulo de flexibilidad axial de los pernos
#Si no hay arandela, fórmula 43
if not arandela:
    X_W = 0      #Módulo de flexibilidad axial de la arandela
    X_W_ = 0
#Si hay arandela, fórmulas 44 a 48
else:
    b_W = (d_W2 - d_W1)/2      #Anchura de arandela 1
    b_W_ = (d_W2_ - d_W1_)/2    #Anchura de arandela 2
    d_W = (d_W2 + d_W1)/2      #Diámetro medio de la arandela 1
    d_W_ = (d_W2_ + d_W1_)/2    #Diámetro medio de la arandela 2
    d_K1 = max(d_5, d_W1)      #Diámetro de contacto extremo interior 1
    d_K1_ = max(d_5_, d_W1_)    #Diámetro de contacto extremo interior 2
    d_K2 = min(d_B4, d_W2)      #Diámetro de contacto extremo exterior 1
    d_K2_ = min(d_B4_, d_W2_)    #Diámetro de contacto extremo exterior 2
    d_KB = (d_K2 - d_W1) / 2
    b_KB = (d_K2 - d_K1)/2      #Anchura 1 de contacto del lado del perno
    b_KB_ = (d_K2 - d_K1)/2     #Anchura 2 de contacto del lado del perno
    #Módulo de flexibilidad de las arandelas, fórmulas 49 y 50
    X_W = (e_W / (n_B * math.pi * d_W * b_W)) * ((2 * b_W / (b_W + b_KB)
+ e_W / (b_W - b_KB)) / (1 + e_W / (b_W - b_KB)))      #Módulo de
flexibilidad axial de la arandela
    X_W_ = (e_W_ / (n_B * math.pi * d_W_ * b_W_)) * ((2 * b_W_ / (b_W_
+ b_KB_) + e_W_ / (b_W_ - b_KB_)) / (1 + e_W_ / (b_W_ - b_KB_)))

#6.4 PARÁMETROS DE LAS JUNTAS DE ESTANQUIDAD
#Dimensiones teóricas, fórmulas 51, 52 ,53
b_Gt = (d_G2 - d_G1)/2      #Anchura teórica de la junta de estanquidad
d_Gt = (d_G2 + d_G1)/2      #Diámetro teórico de la junta de estanquidad
A_Gt = math.pi*d_Gt*b_Gt     #Área teórica de la junta de estanquidad

```

B.3. Bloque 3

```

#Fórmula 54 o 1
if F_Bspec == 0:
    F_G[0] = A_B * f_B[0] / 3 - F_R[0]
else:
    F_G[0] = F_Bspec * (1-epsilon_plus) - F_R[0]

```

B.4. Bloque 4

```

F_G0ant = 0
while abs(F_G[0]-F_G0ant)*100/F_G[0] > 0.1:
    #En las siguientes fórmulas (64 a 76) vienen las fórmulas para la
    geometría útil de la junta de estanquidad

```

```

#Para juntas plana, de baja dureza, compuestas o metálicas,
materiales. Fórmulas 64 a 68
b_Geant = 0
if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
    b_Gi = b_Gt #Para empezar iteración b_Ge
elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
    b_Gi = math.sqrt(6*r_2*math.cos(fi_g)*b_Gt*Q_smax/E_G0)
elif tipo_seccion_junta == 'Junta octogonal':
    b_Gi = b_Ge
elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular':
    b_Gi = math.sqrt(12*r_2*math.cos(fi_G)*b_Gt*Q_smax/E_G0)
b_Ge = min(b_Gi, b_Gt) #Anchura útil de la junta de estanquidad
E_G = E_G_Q_G0 #Módulo de la junta de estanquidad para
descompresión/compresión a la temperatura considerada, teniendo en
cuenta el espesor inicial comprimido
while abs(b_Ge-b_Geant)*100/b_Ge > 0.1:
    if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida ciega':
        if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
            d_Ge = d_G2 - b_Ge #Diámetro útil de la junta de estan
quidad.
        elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
            d_Ge = d_G0
        elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular'
or 'Junta octogonal':
            d_Ge = d_Gt
            h_G = (d_3e - d_Ge) / 2 #Brazo de palanca.
        if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida ciega':
            if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
                d_Ge = d_G2 - b_Ge #Diámetro útil de la junta de estan
quidad.
            elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
                d_Ge = d_G0
            elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular'
or 'Junta octogonal':
                d_Ge = d_Gt
                h_G = (d_3e - d_Ge) / 2
        if tipo_brida1 == 'Brida loca' and Collarin:
            if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
                d_Ge = d_G2 - b_Ge
            elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
                d_Ge = d_G0
            elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular'
or 'Junta octogonal':
                d_Ge = d_Gt
                ji = (Z_L * E_F[0]) / (Z_F * E_L[0]) #Variable intermedia
                d_7min = d_6 + 2 * b_0
                d_7max = d_8
                d_70 = min(max(d_7min, (d_Ge + ji * d_3e) / (1 + ji)), d_7max)
                h_G0 = (d_70 - d_Ge) / 2 #Brazo de palanca

```

```

d_7 = d_70
if tipo_brida2 == 'Brida loca' and Collarin
    if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
        d_Ge = d_G2 - b_Ge
    elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
        d_Ge = d_G0
    elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular'
or 'Junta octogonal':
        d_Ge = d_Gt
        ji_ = (Z_L_ * E_F[0]) / (Z_F_ * E_L[0])
        d_7min_ = d_6_ + 2 * b_0_
        d_7max_ = d_8_
        d_70_ = min(max(d_7min_, (d_Ge + ji_ * d_3e_) / (1 + ji_)),
d_7max_)
        h_G0_ = (d_70_ - d_Ge) / 2
        d_7_ = d_70_

if tipo_seccion_junta == 'Junta plana':
    if tipo_material_junta == 'Metalica':
        E_Gm = E_G[0]
    elif tipo_material_junta == 'No metalica':
        E_Gm = 0.5 * E_G[0]
    b_Gi = math.sqrt((e_G_Q_G0/(math.pi*d_Ge*E_Gm)) / ((h_G*Z_F/E
_F[0] + h_G*Z_F/E_F[0])) + ((F_G[0]/(math.pi*d_Ge*Q_smax))**2))
#Anchura intermedia de la junta de estanquidad.
#Para juntas metálicas con, superficies curvas, contacto simple
Fórmulas 69, 70 y 71
    elif tipo_seccion_junta == 'Junta con superficie curva':
        b_Gi = math.sqrt(((6*r_2*math.cos(fi_G)*F_G[0])/(math.pi*d_Ge
*E_G[0])) + (F_G[0]/(math.pi*d_Ge*Q_smax))**2)
#Para juntas metálicas de sección octogonal. Fórmulas 72 y 73
    elif tipo_seccion_junta == 'Junta octogonal':
        b_Gi = b_Ge
#Para juntas de sección oval o circular, contacto doble.
Fórmulas 74, 75 y 76
    elif tipo_seccion_junta == 'Junta oval' or 'Junta circular':
        b_Gi = math.sqrt(((12*r_2*math.cos(fi_G)*F_G0)/(math.pi*d_Ge*
E_G[0])) + (F_G[0] + (math.pi*d_Ge*Q_smax))**2)

b_Geant = b_Ge
b_Ge = min(b_Gi, b_Gt)
A_Ge = math.pi * d_Ge * b_Ge #Área útil de la junta de
estanquidad

```

B.5. Bloque 5

```

X_G = (e_G_Q_G0/A_Gt) * (b_Gt+e_G_Q_G0/2) / (b_Ge+e_G_Q_G0/2)
#Módulo de flexibilidad axial de la junta de estanquidad

```

```

#6.4.5 Brazos de palanca
#Para todas las bridas, excepto brida ciega. Fórmulas 78 y 77
h_P = (((d_Ge - d_E)**2)*(2*d_Ge + d_E)/6+2*(e_P**2)*d_F)/d_Ge**2
#Corrección brazo de palanca
h_P_ = (((d_Ge - d_E_)**2)*(2*d_Ge + d_E_)/6+2*(e_P_**2)*d_F_)/
d_Ge**2

#Para brida integral y collarin. Fórmula 79
if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    h_Q = (h_S*k_Q+h_T*(2*d_F*e_P/d_E**2 - 0.5*(math.tan(fi_S))))*
(d_E/d_Ge)**2 #Corrección brazo de palanca
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    h_Q_ = (h_S_*k_Q_+h_T_*(2*d_F_*e_P_ / d_E_**2 -
0.5*(math.tan(fi_S_))))*(d_E_/d_Ge)**2
if tipo_brida2 == 'Brida ciega':
    h_Q_ = (d_E_*(1- rho**2)/8)*((0.7+3.3*rho**2)/(0.7+1.3*rho**2))
*(d_E_/d_Ge)**2
#Para brida loca. Fórmula 80
#if tipo_brida1 == 'Brida loca':
    h_Q = (d_E/8) * (1-rho**2)*(0.7 + 3.3*rho**2)/
(0.7 + 1.3*rho**2)*(d_E/d_Ge)**2 #Corrección brazo de palanca
if tipo_brida2 == 'Brida loca':
    h_Q_ = (d_E_/8)*(1-rho**2) * (0.7 + 3.3*rho**2) /
(0.7 + 1.3*rho**2) * (d_E_/d_Ge)**2

#Para brida loca y brida integral, no collarín. Fórmulas 81, 82 y
83
if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
    h_H = (d_3e - d_E) / 2 #Brazo de palanca.
    h_L = 0 #Brazo de palanca.
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca':
    h_H_ = (d_3e_ - d_E_) / 2
    h_L_ = 0
#Para brida loca con collarín. Fórmulas 84 a 89
if tipo_brida1 == 'Brida loca' and Collarin:
    h_H = (d_7 - d_E)/2 #Brazo de palanca
    h_L = (d_3e - d_7)/2 #Brazo de palanca
if tipo_brida2 == 'Brida loca' and Collarin:
    h_H_ = (d_7_ - d_E_)/2
    h_L_ = (d_3e_ - d_7_)/2

```

B.6. Bloque 6

```

#7 FUERZAS
#7.2 Cargas aplicadas
A_Q = (math.pi * d_Ge**2) / 4 #Área útil para la fuerza axial
resultante de la presión del fluido

```

```

for I in [0, 1, 2, 3]:
    F_Q[I] = A_Q * P[I] #Fuerza axial resultante de la
    presión del fluido
    #Fórmulas 92 a 96 (Cargas exteriores adicionales)
    F_A[I] = F_Z[I] #Fuerza axial exterior adicional.
    F_L[I] = math.sqrt(F_X[I]**2 + F_Y[I]**2) #Fuerza resultante
    de las fuerzas radiales adicionales
    M_A[I] = math.sqrt(M_X[I]**2 + M_Y[I]**2) #Momento de flexión
    exterior resultante
    M_TG[I] = M_Z[I] #Momento de torsión
    exterior adicional debido al rozamiento
    F_R[I] = F_A[I] + (4/d_3e) * M_A[I] #Fuerza resultante
    de cargas exteriores adicionales
    #F_R[I] = F_A[I] - (4/d_3e) * M_A[I]
    DeltaU[I] = l_B*alpha_B[I]*(T_B[I]-T_0[I]) -
    e_Ft*alpha_F[I]*(T_F[I]-T_0[I]) - e_L*alpha_L[I]*(T_L[I]-T_0[I]) -
    e_W*alpha_W[I]*(T_W[I]-T_0[I]) - e_G_Q_G0*alpha_G*(T_G[I]-T_0[I]) -
    e_Ft_*alpha_F_[I]*(T_F_[I]-T_0[I]) - e_L_*alpha_L_[I]*(T_L_[I]-
    T_0[I]) - e_W_*alpha_W_[I]*(T_W_[I]-T_0[I]) #Diferencial de las
    expansiones axiales térmicas

    #7.3 Cumplimiento de la unión (Se aplican para todas las condic
    iones I=0,1,2...). Fórmulas 99 a 102
    if arandela == True:
        if E_L[I] == 0:
            Y_B[I] = X_B/(E_B[I]*relax_B) + X_W/E_W[I] + X_W_/E_W_[I]
        else:
            Y_B[I] = Z_L*(h_L**2)/E_L[I] + Z_L_*(h_L_**2)/E_L_[I] + X_B/
            (E_B[I]*relax_B) + X_W/E_W[I] + X_W_/E_W_[I] #Conformidad axial
            de la unión atornillada relativa a F_B
        else:
            if E_L[I] == 0:
                Y_B[I] = X_B/(E_B[I]*relax_B)
            else:
                Y_B[I] = Z_L*(h_L**2)/E_L[I] + Z_L_*(h_L_**2)/E_L_[I] + X_B
                /(E_B[I]*relax_B) #Conformidad axial de la unión atornillada
                relativa a F_B

            Y_G[I] = Z_F*(h_G**2)/E_F[I] + Z_F_*(h_G_**2)/E_F_[I] + Y_B[I]
            + X_G/E_G[I] #Conformidad axial de la unión atornillada relativa
            a F_G
            Y_Q[I] = Z_F*h_G*(h_H-h_P+h_Q)/E_F[I] + Z_F_*h_G_*(h_H_-
            h_P_+h_Q_)/E_F_[I] + Y_B[I] #Conformidad axial de la unión
            atornillada relativa a F_Q
            Y_R[I] = Z_F*h_G*(h_H+h_R)/E_F[I] + Z_F_*h_G_*(h_H_+h_R_)/E_F_[
            I] + Y_B[I] #Conformidad axial de la unión atornillada relativa
            a F_R

    #7.4 Fuerzas mínimas necesarias en la junta de estanquidad

```

```

Q_A = F_G[0] / A_Ge
F_Gmin[0] = A_Ge * Q_A

if I > 0:
    F_Gmin[I] = max(A_Ge*Q_smin, -(F_Q[I]+F_R[I]),
                    (F_L[I]/mu_g)+(2*M_TG[I]/(mu_g*d_Gt))-(2*M_A[I]/d_Gt))
    #Fuerza minima necesaria en la junta de estanquidad

#7.5 Fuerzas interiores en la condición de montaje
if I > 0:
    tmpF_Gdelta[I] = (F_Gmin[I]*Y_G[I] + F_Q[I]*Y_Q[I] + (F_R[I]*
Y_R[I]-F_R[0]*Y_R[0]) + DeltaU[I]) / (Y_G[0]*P_QR[I])
    F_Gdelta = 0
for I in [1, 2, 3]:
    F_Gdelta = max(F_Gdelta, tmpF_Gdelta[I])

F_G0ant = F_G[0]
F_G0_req = max(F_Gmin[0], F_Gdelta)
F_B0_req = F_G0_req + F_R[0]
F_G[0] = F_G0_req

```

B.7. Bloque 7

Primeramente, aparece mostrada la función donde se calculan las fuerzas y momentos sobre los pernos.

```
epsilon_plus, epsilon_minus, F_Bnom, M_tnom, F_B0nom, M_tB=anexoB()
```

```

#ANEXO B (apriete)
def anexoB():
    #Apriete manual no controlado (A_B [mm**2], f_B0 [MPa], F_B0av [N
    ]). Fórmula B.3
    if tipo_apriete == 'manual':
        F_B0av = min(A_B*f_B[0], n_B*200000) #Valor medio de la fuerza
        total sobre el perno
    #Apriete utilizando llave dinamométrica. Fórmulas B.4, B.5, B.6
    if tipo_apriete == 'Llave dinamometrica':
        k_B = 0.159*p_t + 0.577*mu_t*d_B2 + 0.5*mu_n*d_n #Rosca de
        perfil triangular ISO
        if F_Bspec == 0:
            F_Bnom = F_B0_req / (1-epsilon_minus)
        else:
            F_Bnom = F_Bspec
        M_tnom = k_B*F_Bnom / n_B #Par de apriete nominal aplicado
        F_B0nom = n_B*M_tnom / k_B #Fuerza de apriete nominal
        #Momento sobre el vástago. B.9
        M_tB = (0.159*p_t + 0.577*mu_t*d_B2)*F_B0nom/n_B #Momento
        de torsión sobre el vástago del perno
    return epsilon_plus, epsilon_minus, F_Bnom, M_tnom, F_B0nom, M_tB

```

A partir de aquí viene representada la continuación del programa:

```
F_B0max = F_B0nom * (1+epsilon_plus) #Fuerza máxima sobre el perno
en la condición de montaje
F_G0max = F_B0max - F_R[0]           #Fuerza máxima sobre la junta
en la condición de montaje
#7.6 Fuerzas internas en las condiciones posteriores (I=1,2,...)
for I in [0, 1, 2, 3]:
    if I > 0:
        if F_Bspec == 0:
            if N_R == 0:
                F_G0d = F_Gdelta
            else:
                F_G0d = max(F_Gdelta, (2/3)*(1-10/N_R)*F_B0max-F_R[0])
                #Fuerza de montaje en la junta de estanquidad
        else:
            F_Bmin = F_Bspec * (1 - epsilon_minus)
            if N_R == 0:
                F_G0d = F_Bmin - F_R[0]
            else:
                F_G0d = max(F_Bmin - F_R[0], (2/3)*(1-
10/N_R)*F_B0max - F_R[0]) #Fuerza de montaje en la junta de
estanquidad
            #Fórmula 120 (no tiene en cuenta la deformación plástica)
            F_G[I] = (F_G0d*Y_G[0]*P_QR[I] - (F_Q[I]*Y_Q[I]+(F_R[I]*Y_R[I]-
F_R[0]*Y_R[0]) + DeltaU[I])) / Y_G[I] #Fuerza sobre la junta de
estanquidad
            #Fórmula 122, fuerza que se ejerce sobre el perno
            F_B[I] = F_G[I] + (F_Q[I] + F_R[I]) #Fuerza sobre los pernos

delta_lB = F_Bnom*X_B/E_B[0]         #Elongación del perno
for I in [0, 1, 2, 3]:
    Q_G[I] = F_G[I] / A_Ge            #Tensión de compresión media útil
de la junta de estanquidad
```

B.8. Bloque 8

#Función para calcular k_M y psi_Z. Tabla 2 del punto 8.4

```
def tabla_2_1():
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        if j_M[I] == 1:
            if psi_max[I] <= psi_opt[I]:
                k_M[I] = 1
                psi_Z[I] = psi_max[I]
            elif psi_0[I] <= psi_opt[I] and psi_opt[I] < psi_max[I]:
                k_M[I] = 1
                psi_Z[I] = psi_opt[I]
            elif psi_opt[I] < psi_0[I]:
                k_M[I] < 1
```



```

        psi_Z[I] = ((f_E[I]*d_E*e_D*math.cos(fi_S))/(f_F[I]*2*b_F*
e_F))*((0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])*(math.tan(fi_S))-
delta_Q[I]*2*e_P/d_E + -1*1*math.sqrt(e_D*c_M[I]*c_S[I]*(1+
-1*k_M[I]))/(d_E*math.cos(fi_S)**3)))
    elif j_M[I] == -1:
        if psi_opt[I] <= psi_min[I]:
            k_M[I] = -1
            psi_Z[I] = psi_min[I]
        elif psi_min[I] < psi_opt[I] and psi_opt[I] <= psi_0[I]:
            k_M[I] = -1
            psi_Z[I] = psi_opt[I]
        elif psi_0[I] < psi_opt[I]:
            k_M[I] > -1
            psi_Z[I] = ((f_E[I]*d_E*e_D*math.cos(fi_S))/(f_F[I]*2*b_F*
e_F))*((0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])*(math.tan(fi_S)) - delta_Q[I]*2*
e_P/d_E +1*1*math.sqrt(e_D*c_M[I]*c_S[I]*(1+1*k_M[I]))/
(d_E*math.cos(fi_S)**3)))
    return k_M[I], psi_Z[I]

def tabla_2_2():
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        if j_M_[I] == 1:
            if psi_max_[I] <= psi_opt_[I]:
                k_M_[I] = 1
                psi_Z_[I] = psi_max_[I]
            elif psi_0_[I] <= psi_opt_[I] and psi_opt_[I] < psi_max_[I]:
                k_M_[I] = 1
                psi_Z_[I] = psi_opt_[I]
            elif psi_opt_[I] < psi_0_[I]:
                k_M_[I] < 1
                psi_Z_[I] = ((f_E_[I]*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))/(f_F_[I]*2
*b_F_*e_F_))*((0.5*delta_Q_[I]+delta_R_[I])*(math.tan(fi_S_))-
delta_Q_[I]*2*e_P_/d_E_ + -1*1*math.sqrt(e_D_*c_M_[I]*c_S_[I]*(1+
-1*k_M_[I]))/(d_E_*math.cos(fi_S_)**3)))
        elif j_M_[I] == -1:
            if psi_opt_[I] <= psi_min_[I]:
                k_M_[I] = -1
                psi_Z_[I] = psi_min_[I]
            elif psi_min_[I] < psi_opt_[I] and psi_opt_[I] <= psi_0_[I]:
                k_M_[I] = -1
                psi_Z_[I] = psi_opt_[I]
            elif psi_0_[I] < psi_opt_[I]:
                k_M_[I] > -1
                psi_Z_[I] = ((f_E_[I]*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))/(f_F_[I]*2
*b_F_*e_F_)) * ((0.5*delta_Q_[I]+delta_R_[I])*(math.tan(fi_S_)) -
delta_Q_[I]*2*e_P_/d_E_ + 1*1*math.sqrt(e_D_*c_M_[I]*c_S_[I]*(1+1*
k_M_[I]))/(d_E_*math.cos(fi_S_)**3)))
    return k_M_[I], psi_Z_[I]

```

#8. LÍMITES DE CARGA

#8.2 Relación de carga de los pernos. Fórmulas 123 a 127.

```

if A >= 0.1: #10% alargamiento mínimo
    c_A = 1 #Factor de corrección
elif A < 0.1:
    c_A = 4/3 #Factor de corrección
for I in [0, 1, 2, 3]:
    l_5t[I] = 0.8*d_B0*f_B[I]
    l_5t_[I] = 0.8*d_B0*f_B[I]
    c_B1[I] = min(1, e_N*f_N[I]/(0.8*d_B0*f_B[I]), l_5t[I]*f_F[I] /
(0.8*d_B0*f_B[I]))
    c_B2[I] = min(1, e_N*f_N[I]/(0.8*d_B0*f_B[I]), l_5t_[I]*f_F_[I] /
(0.8*d_B0*f_B[I]))
    c_B[I] = min(c_B1[I], c_B2[I])
    if I > 0:
        c_A = 0 #Factor de corrección
    if I == 0:
        phi_B[I] = (1/(f_B[I]*c_B[I])) * math.sqrt((F_B0max/A_B)**2 +
3*(c_A*M_tB*(1+epsilon_plus)/I_B)**2) #Relación de carga del perno
    else:
        phi_B[I] = (1/(f_B[I]*c_B[I])) * math.sqrt((F_B[I]/A_B)**2 +
3*(c_A*M_tB/I_B)**2) #Relación de carga del perno

```

#8.3 Relación de carga de la junta de estanquidad. Fórmula 128

```

for I in [0, 1, 2, 3]:
    if I == 0:
        phi_G[I] = F_G0max / (A_Gt*Q_smax) #Relación de carga de la
junta de estanquidad
    else:
        phi_G[I] = F_G[I] / (A_Gt*Q_smax) #Relación de carga de la
junta de estanquidad

```

#8.4 Relación de carga de brida integral y collarín. Fórmulas 129 a 144

```

if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        delta_R[I] = F_R[I]*(f_E[I]*math.pi*d_E*e_D*math.cos(fi_S))
        #Variable intermedia
        delta_Q[I] = P[I]*d_E / (f_E[I]*2*e_D*math.cos(fi_S))
        #Variable intermedia
        j_S = -1
        if tipo_carcasa == 'Carcasa cónica' or 'Carcasa cilíndrica':
            c_M[I] = math.sqrt(1.33*(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])
**2)*(1 - (0.75*delta_Q[I]**2 + 1*delta_R[I]**2))) #Factor de
corrección
            c_Splus1[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]
+ delta_R[I])**2) + 1*(0.5*delta_R[I] - 0.75*delta_Q[I]) #Factor de
corrección

```

```

    c_Sminus1[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]
+ delta_R[I])**2) - 1*(0.5*delta_R[I] - 0.75*delta_Q[I]) #Factor de
corrección
    c_S[I] = max(c_Splus1[I], c_Sminus1[I])
    elif 'Carcasa esférica':
        c_M[I] = math.sqrt(1.33*(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])
**2)*(1 - (0.25*delta_Q[I]**2 + 3*delta_R[I]**2))) #Factor de
corrección
        c_Splus1[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]
+ delta_R[I])**2) + 1*(1.5*delta_R[I] - 0.25*delta_Q[I]) #Factor
de corrección
        c_Sminus1[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q[I]
+ delta_R[I])**2) - 1*(1.5*delta_R[I] - 0.25*delta_Q[I]) #Factor
de corrección
        c_S[I] = max(c_Splus1[I], c_Sminus1[I])

    j_M[I] = (F_G[I]*h_G + F_Q[I]*(h_H+h_P)+F_R[I]*h_H)/abs(F_G[I]*
h_G + F_Q[I]*(h_H-h_P) + F_R[I]*h_H)
    psi_opt[I] = j_M[I] * (2*e_P/e_F - 1)
    psi_0[I] = ((f_E[I]*d_E*e_D*math.cos(fi_S))/(f_F[I]**2*b_F*e_F))
* ((0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])*(math.tan(fi_S))- delta_Q[I]**2*e_P/
d_E + 0*0*math.sqrt(e_D*c_M[I]*c_S[I]*(1+0*0)/(d_E*math.cos(fi_S)**
3)))
    psi_max[I] = ((f_E[I]*d_E*e_D*math.cos(fi_S))/(f_F[I]**2*b_F*
e_F))*((0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])*(math.tan(fi_S)) - delta_Q[I]**2*
e_P/d_E + 1*1*math.sqrt(e_D*c_M[I]*c_S[I]*(1+1*1)/(d_E*math.cos(fi_
S)**3)))
    psi_min[I] = ((f_E[I]*d_E*e_D*math.cos(fi_S))/(f_F[I]**2*b_F*
e_F))*((0.5*delta_Q[I]+delta_R[I])*(math.tan(fi_S)) - delta_Q[I]**2*
e_P/d_E + -1*1*math.sqrt(e_D*c_M[I]*c_S[I]*(1+-1*-1)
/(d_E*math.cos(fi_S)**3)))

    k_M[I], psi_Z[I] = tabla_2_1()
if tipo_brida1 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        W_F[I] = (math.pi/4)*(f_F[I]**2*b_F*(e_F**2)*(1+2*psi_opt[I]*
psi_Z[I] - (psi_Z[I]**2))+f_E[I]*d_E*(e_D**2)*c_M[I]*j_M[I]*k_M[I])
#Resistencia de la brida
        if I == 0:
            phi_F[I] = abs(F_G0max*h_G + F_Q[I]*(h_H-h_P+h_Q)+
F_R[I]*(h_H+h_R))/W_F[I] #Relación de carga de la brida
        else:
            phi_F[I] = abs(F_G[I]*h_G + F_Q[I]*(h_H-
h_P+h_Q)+ F_R[I]*(h_H+h_R))/W_F[I]
if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        delta_R_[I] =F_R[I]*(f_E_[I]*math.pi*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))
        delta_Q_[I] = P[I]*d_E_ / (f_E_[I]**2*e_D_*math.cos(fi_S_))
        j_S = -1

```

```

    if tipo_carcasa == 'Carcasa cónica' or 'Carcasa cilíndrica':
        c_M_[I] = math.sqrt(1.33*(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]+
        delta_R_[I])**2)*(1 - (0.75*delta_Q_[I]**2 + 1*delta_R_[I]**2)))
        c_Splus2[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]
        + delta_R_[I])**2) + 1*(0.5*delta_R_[I] - 0.75*delta_Q_[I])
        c_Sminus2[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]
        +delta_R_[I])**2) - 1*(0.5*delta_R_[I] - 0.75*delta_Q_[I])
        c_S_[I] = max(c_Splus2[I], c_Sminus2[I])
    elif 'Carcasa esférica':
        c_M_[I] = math.sqrt(1.33*(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]+
        delta_R_[I])**2)*(1 - (0.25*delta_Q_[I]**2 + 3*delta_R_[I]**2)))
        c_Splus2[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]
        + delta_R_[I])**2) + 1*(1.5*delta_R_[I] - 0.25*delta_Q_[I])
        c_Sminus2[I] = (math.pi/4)*math.sqrt(1 - 0.75*(0.5*delta_Q_[I]
        + delta_R_[I])**2) - 1*(1.5*delta_R_[I] - 0.25*delta_Q_[I])
        c_S_[I] = max(c_Splus2[I], c_Sminus2[I])
    j_M_[I] = (F_G[I]*h_G_+F_Q[I]*(h_H_-h_P_)+F_R[I]*h_H_)/
    abs(F_G[I]*h_G_ + F_Q[I]*(h_H_-h_P_) + F_R[I]*h_H_)
    psi_opt_[I] = j_M_[I] * (2*e_P_/e_F_ - 1)
    psi_0_[I] = ((f_E_[I]*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))/(f_F_[I]**2*
    b_F_*e_F_)) * ((0.5*delta_Q_[I]+delta_R_[I])*(math.tan(fi_S_)) -
    delta_Q_[I]**2*e_P_/d_E_+0*0*math.sqrt(e_D_*c_M_[I]*c_S_[I]*(1+0*0)/
    (d_E_*math.cos(fi_S_)**3)))
    psi_max_[I] = ((f_E_[I]*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))/(f_F_[I]**2*
    b_F_*e_F_)) * ((0.5*delta_Q_[I]+delta_R_[I])*(math.tan(fi_S_)) -
    delta_Q_[I]**2*e_P_/d_E_+1*1*math.sqrt(e_D_*c_M_[I]*c_S_[I]*(1+1*1)/
    (d_E_*math.cos(fi_S_)**3)))
    psi_min_[I] = ((f_E_[I]*d_E_*e_D_*math.cos(fi_S_))/(f_F_[I]**2*
    b_F_*e_F_)) * ((0.5*delta_Q_[I]+delta_R_[I])*(math.tan(fi_S_)) -
    delta_Q_[I]**2*e_P_/d_E_ + -1*1*math.sqrt(e_D_*c_M_[I]*c_S_[I]*
    (1+-1*-1)/(d_E_*math.cos(fi_S_)**3)))

    k_M_[I], psi_Z_[I] = tabla_2_2()
    if tipo_brida2 == 'Brida integral' or 'Brida loca' and Collarin:
        for I in [0, 1, 2, 3]:
            W_F_[I] = (math.pi/4)*(f_F_[I]**2*b_F_*(e_F_**2) *
            (1+2*psi_opt_[I]*psi_Z_[I] - (psi_Z_[I]**2))+f_E_[I]*d_E_*(e_D_**2)
            *c_M_[I]*j_M_[I]*k_M_[I])
            if I == 0:
                phi_F_[I] = abs(F_G0max*h_G_+F_Q[I]*(h_H_-h_P_+h_Q_)+
                F_R[I]*(h_H_+h_R_))/W_F_[I]
            else:
                phi_F_[I] = abs(F_G[I]*h_G_ + F_Q[I]*(h_H_- h_P_+h_Q_)+
                F_R[I]*(h_H_+h_R_)) / W_F_[I]

```

#8.5 Relación de carga de brida ciega

#Fórmulas 145 a 148

```

if tipo_brida2 == 'Brida ciega':
    for I in [0, 1, 2, 3]:

```

```

W_F_[I] = (math.pi/4) * f_F_[I] * (2*b_F_*(e_F_**2) + d_0_*(1-rho)*(e_0**2)) #Resistencia de la brida
if I == 0:
    phi_F_[I] = max(abs(F_B0max*h_G_ + F_Q[I]*(1-rho**3)*d_Ge/6 + F_R[I]*(1-rho)*d_Ge/2), abs(F_B0max*h_G_ + F_Q[I]*(1-rho**3)*d_Ge/6), abs(F_R[I]*(1-rho)*d_Ge/2))/W_F_[I]
if I > 0:
    phi_F_[I] = max(abs(F_B[I]*h_G_ + F_Q[I]*(1-rho**3)*d_Ge/6 + F_R[I]*(1-rho)*d_Ge/2), abs(F_B[I]*h_G_ + F_Q[I]*(1-rho**3)*d_Ge/6), abs(F_R[I]*(1-rho)*d_Ge/2))/W_F_[I]
if e_X < e_F:
    W_X_[I] = (math.pi/4)*f_F_[I]*((d_4_-2*d_5e_-d_X_)*(e_F_**2) + d_X_*(e_X_**2))
    fi_X_[I] = F_B[I]*(d_3_-d_X_)/(2*W_X_[I])

#8.6 Relación de carga de brida loca con collarín
#Fórmulas 149 a 151
if tipo_brida1 == 'Brida loca' and Collarin:
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        W_L[I] = (math.pi/2)*f_L[I]*b_L*(e_L**2) #Resistencia de la brida loca
        if I == 0:
            phi_L[I] = F_B0max*h_L/W_L[I] #Relación de carga de la brida loca
        else:
            phi_L[I] = F_B[I]*h_L/W_L[I]
            if (d_G2-d_7) > 0:
                phi_F[I] = (abs(F_Q[I]+F_R[I])*h_H)/((math.pi/4)*d_E*(f_E[I]*min(e_E**2, e_F**2) + min(f_F[I]*(e_F**2), Q_max*((d_G2-d_7)**2)/4))) #Relación de carga de la brida

if tipo_brida2 == 'Brida loca' and Collarin:
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        W_L_[I] = (math.pi/2)*f_L_[I]*b_L_*(e_L_**2)
        if I == 0:
            phi_L_[I] = F_B0max*h_L_/W_L_[I]
        else:
            phi_L_[I] = F_B[I]*h_L_/W_L_[I]
            if (d_G2-d_7) > 0:
                phi_F_[I] = (abs(F_Q[I]+F_R[I])*h_H)/((math.pi/4)*d_E_*(f_E_[I]*min(e_E_**2, e_F_**2) + min(f_F_[I]*(e_F_**2), Q_max*((d_G2-d_7_)**2)/4)))

```

B.9. Bloque 9

```

theta_Lmin[I], theta_Lmin_[I], theta_Lmax[I], theta_Lmax_[I],
theta_Fmin[I], theta_Fmin_[I], theta_Fmax[I], theta_Fmax_[I] =
anexoC()
#Anexo C
def anexoC():
    for I in [0, 1, 2, 3]:
        if I == 0:
            F_BminA[I] = F_B0nom*(1-epsilon_minus)
            F_BmaxA[I] = F_B0nom*(1+epsilon_plus)
            F_GminA[I] = F_BminA[I] - F_R[I]
            F_GmaxA[I] = F_BmaxA[I] - F_R[I]
        if I > 0:
            F_GminA[I] = (F_GminA[0]*Y_G[0]*P_QR[I] - (F_Q[I]*Y_Q[I] +
(F_R[I]*Y_R[I] - F_R[0]*Y_R[0]) + DeltaU[I])) / Y_G[I]
            F_GmaxA[I] = (F_GmaxA[0]*Y_G[0]*P_QR[I] - (F_Q[I]*Y_Q[I] +
(F_R[I]*Y_R[I] - F_R[0]*Y_R[0]) + DeltaU[I])) / Y_G[I]
            F_BminA[I] = F_GminA[I] + (F_Q[I]+F_R[I])
            F_BmaxA[I] = F_GmaxA[I] + (F_Q[I]+F_R[I])
        if E_L[I] == 0:
            theta_L = 0
            theta_Lmin[I] = 0
            theta_Lmin_[I] = 0
            theta_Lmax[I] = 0
            theta_Lmax_[I] = 0
        else:
            theta_Lmin[I] = radToDeg*(Z_L/E_L[I])*F_BminA[I]*h_L
            theta_Lmin_[I] = radToDeg*(Z_L_/E_L_[I])*F_BminA[I]*h_L_
            theta_Lmax[I] = radToDeg*(Z_L/E_L[I])*F_BmaxA[I]*h_L
            theta_Lmax_[I] = radToDeg*(Z_L_/E_L_[I])*F_BmaxA[I]*h_L_

            theta_F[I] = radToDeg*(Z_F/E_F[I])*(F_G[I]*h_G + F_Q[I]*(h_H-
h_P+h_Q) + F_R[I]*(h_H+h_R))
            theta_Fmin[I] = radToDeg*(Z_F/E_F[I])*(F_GminA[I]*h_G + F_Q[I]*
(h_H-h_P+h_Q) + F_R[I]*(h_H+h_R))
            theta_Fmin_[I] = radToDeg*(Z_F_/E_F_[I])*(F_GminA[I]*h_G_ +
F_Q[I]*(h_H_-h_P_+h_Q_) + F_R[I]*(h_H_+h_R_))
            theta_Fmax[I] = radToDeg*(Z_F/E_F[I])*(F_GmaxA[I]*h_G + F_Q[I]*
(h_H-h_P+h_Q) + F_R[I]*(h_H+h_R))
            theta_Fmax_[I] = radToDeg*(Z_F_/E_F_[I])*(F_GmaxA[I]*h_G_ +
F_Q[I]*(h_H_-h_P_+h_Q_) + F_R[I]*(h_H_+h_R_))
    return theta_Lmin[I],theta_Lmin_[I],theta_Lmax[I],theta_Lmax_[I],
theta_Fmin[I],theta_Fmin_[I],theta_Fmax[I],theta_Fmax_[I]

```

Por último, y, aunque no se ha incluido en ninguno de estos bloques, aquí se muestra la salida del programa:

```
print('OUTPUT RESULTS\n')

print('Assembly Setings')
print('nominal torque: ', M_tnom)
print('bolt elongation: ', delta_lB)
print('nominal bolt force: ', F_B0nom, '\n')
if F_B0min >= F_B0_req:
    print('check min. bolt force:', 1, '\n')
else:
    print('check min. bolt force:', 0, '\n')

print('Check of Leakrate')
print('gasket mod, of elast.:', E_G)
print('gasket compr. thickn.:', e_G_Q_G0)
print('gasket stress', Q_G)
print('min. req. gasket stress:', Q_minL)
print('min. req. str. subs. cond.:', Q_smin, '\n')
if Q_minL >= Q_smin:
    print('check min. req. g. stress:', 1, '\n')
else:
    print('check min. req. g. stress:', 0, '\n')

print('Check of Load Ratio')
print('bolt load ratio:', phi_B)
print('gasket load ratio:', phi_G)
print('flange 1 load ratio:', phi_F)
print('flange 2 load ratio:', phi_F_)
print('loose ring 1 load ratio:', phi_L)
print('loose ring 2 load ratio:', phi_L_, '\n')

print('Flange 1 Rotation')
print('min. flange rotation:', theta_Fmin)
print('max. flange rotation:', theta_Fmax)
print('min. loose ring rotation:', theta_Lmin)
print('max. loose ring rotation:', theta_Lmax, '\n')

print('Flange 2 Rotation')
print('min. flange rotation:', theta_Fmin_)
print('max. flange rotation:', theta_Fmax_)
print('min. loose ring rotation:', theta_Lmin_)
print('max. loose ring rotation:', theta_Lmax_, '\n')
```

ANEXO C. RESULTADOS

En el capítulo 4, se mostró los resultados relativos a los límites de carga debido a que son los valores más importantes a tener en cuenta. Pese a esto, los resultados obtenidos en FLG y en Python no son únicamente estos, sino los mostrados a continuación.

Aquí aparecen mostrados, además de los límites de carga, la fuerza y momento sobre el perno en el montaje, la elongación del perno, los diferentes valores debidos a la tasa de fugas y las rotaciones de las bridas.

Estos resultados son los correspondientes al caso 1, dos bridas integrales de las mismas dimensiones, y, como ya se comentó en las conclusiones, se puede observar que los resultados obtenidos en ambos casos son los mismos.

Output Results

Assembly Settings

		assembly	test cond.	load cond. 1	load cond. 2	unit
nominal torque	$M_{L,nom}$	163,322	-	-	-	- Nmm
bolt elongation	Δl_b	0.0876682	-	-	-	- mm
nominal bolt force	$F_{B,nom}$	385,812	-	-	-	- N
check min. bolt force	$F_{B,min} \geq F_{B,req}$	1	-	-	-	--

Check of Leakrate

gasket mod, of elast.	E_G	1,641	1,641	2,197.11	2,999.25	MPa
gasket compr. thicken.	e_G	4.365	-	-	-	- mm
gasket stress	Q_G	30	20	22.5385	24.2708	MPa
min. req. gasket stress	Q_{minL}	30	-	-	-	- MPa
min. req. str. subs. cond.	Q_{minL}	-	20	20	20	MPa
check min. req. g. stress:	$Q_{min} > Q_{(s)minL}$	1	1	1	1	-

Check of Load Ratio

bolt load ratio	Φ_B	0.422781	0.259417	0.507215	0.51671	-
gasket load ratio	Φ_G	0.176949	0.1	0.112692	0.121354	-
flange 1 load ratio	Φ_F	0.159474	0.142138	0.220202	0.232669	-
flange 2 load ratio	Φ_F	0.159474	0.142138	0.220202	0.232669	-
loose ring 1 load ratio	Φ_L					-
loose ring 2 load ratio	Φ_L					-

Flange 1 Rotation

min. flange rotation	Θ_{Fmin}	0.0556281	0.0673445	0.0680837	0.0696706	°
max. flange rotation	Θ_{Fmax}	0.0656224	0.0772388	0.0790029	0.0814606	°
min. loose ring rotation	Θ_{Lmin}	0	0	0	0	°
max. loose ring rotation	Θ_{Lmax}	0	0	0	0	°

Flange 2 Rotation

min. flange rotation	Θ_{Fmin}	0.0556281	0.0673445	0.0680837	0.0696706	°
max. flange rotation	Θ_{Fmax}	0.0656224	0.0772388	0.0790029	0.0814606	°
min. loose ring rotation	Θ_{Lmin}	0	0	0	0	°
max. loose ring rotation	Θ_{Lmax}	0	0	0	0	°

Imagen C.1. Resultados FLG

Assembly Settings

nominal torque: 163322.15594950036 Nmm
 bolt elongation: 0.08766799742494269 mm
 nominal bolt force: 385811.7498312665 N
 check min. bolt force, $F_{B0min} \geq F_{B0req}$: 1

Check of Leakrate

gasket mod, of elast., E_G : [1641, 1641, 2197.11, 2999.25] MPa
 gasket compr. thickn., $e_G(Q_{G0})$: 4.365 mm
 gasket stress, Q_G : [30.0, 19.999999999999996, 22.477318862432313, 24.149830847605525] MPa
 min. req. gasket stress, Q_{minL} : 30 MPa
 min. req. str. subs. cond., Q_{sminL} : 20 MPa
 check min. req. g. stress, $Q_{minL} > Q_{smin}$: 1

Check of Load Ratio

bolt load ratio, ϕ_{iB} : [0.4227797167442922, 0.2594163021963215, 0.5060489372637449, 0.5144062754678826]
 gasket load ratio, ϕ_{iG} : [0.17694925207801465, 0.09999999999999999, 0.11238659431216157, 0.12074915423802762]
 flange 1 load ratio, ϕ_{iF} : [0.15947445214832986, 0.1414531173891236, 0.21862162566505772, 0.23081394240708442]
 flange 2 load ratio, ϕ_{iF} : [0.15947445214832986, 0.1414531173891236, 0.21862162566505772, 0.23081394240708442]
 loose ring 1 load ratio, ϕ_{iL} : [0, 0, 0, 0]
 loose ring 2 load ratio, ϕ_{iL} : [0, 0, 0, 0]

Flange 1 Rotation

min. flange rotation, θ_{Fmin} : [0.0556281419879169, 0.06734454860021873, 0.06796603972441785, 0.06943052275828698]
 max. flange rotation, θ_{Fmax} : [0.06562238746167666, 0.07723885161924088, 0.07888518019350113, 0.08122053065620793]
 min. loose ring rotation, θ_{Lmin} : [0, 0, 0, 0]
 max. loose ring rotation, θ_{Lmax} : [0, 0, 0, 0]

Flange 2 Rotation

min. flange rotation, θ_{Fmin} : [0.0556281419879169, 0.06734454860021873, 0.06796603972441785, 0.06943052275828698]
 max. flange rotation, θ_{Fmax} : [0.06562238746167666, 0.07723885161924088, 0.07888518019350113, 0.08122053065620793]
 min. loose ring rotation, θ_{Lmin} : [0, 0, 0, 0]
 max. loose ring rotation, θ_{Lmax} : [0, 0, 0, 0]

Imagen C.2. Resultados Python

ANEXO D. GLOSARIO

- **Anillo suelto ('Loose ring')**: anillo que forma parte de una brida loca.
- **Arandela ('Washer')**: anillo plano que coloca debajo de un perno, tornillo o tuerca para evitar fugas y dar firmeza.
- **Brida ('Flange')**: pieza en forma de anillo que permite que una tubería se adhiera a otra o a otros componentes de la tubería mediante una unión atornillada.
- **Brida de cuello de soldadura ('Welding neck')**: bridas con cuello largo cónico que se sueldan a tope con la tubería.
- **Brida deslizante ('Slip-on')**: bridas en las cuales la tubería entra en el cubo de esta sin llegar a la cara opuesta y se une mediante soldadura interna y externa.
- **Carcasa ('Shell')**: pieza rígida que protege y/o contiene un mecanismo.
- **Cargas exteriores ('External loads')**: fuerzas y/o momentos aplicados al conjunto a través de un sistema ligado a ella.
- **Coeficiente de fricción ('Coefficient of friction')**: es la oposición al deslizamiento que producen las superficies de dos cuerpos al estar en contacto entre ellas.
- **Collarín ('Collar' o 'Stub')**: soporte en el que se apoya una brida loca.
- **Diámetro exterior ('Outside diameter')**: medida que hace referencia a la circunferencia de la pared exterior de una tubería.
- **Diámetro interior ('Inside diameter')**: medida que hace referencia a la circunferencia de la pared interior de una tubería.
- **Diámetro nominal ('Nominal diameter')**: nombre dado para representar un tamaño particular de una tubería.
- **Extremo acampanado ('Hub')**: extensión axial del anillo de la brida, generalmente conecta el anillo de la brida a la carcasa.
- **Fuga ('Leak')**: escape de un fluido por pérdida de estanquidad.
- **Junta de estanquidad ('Gasket')**: material que se sitúa entre las bridas para evitar fugas.
- **Perno ('Bolt')**: pieza metálica con una parte roscada en la que se enrosca una tuerca que se utiliza para las bridas.

- **Ranura ('Groove'):** corte o hendidura largo y estrecho en una superficie.
- **Tubería ('Pipe'):** tubo cilíndrico de metal u otros materiales que se utiliza para transportar fluidos.
- **Tuerca ('Nut'):** pieza metálica con un orificio roscado en el centro que utiliza para atornillarse en un perno para unir los objetos por los que este ha pasado.